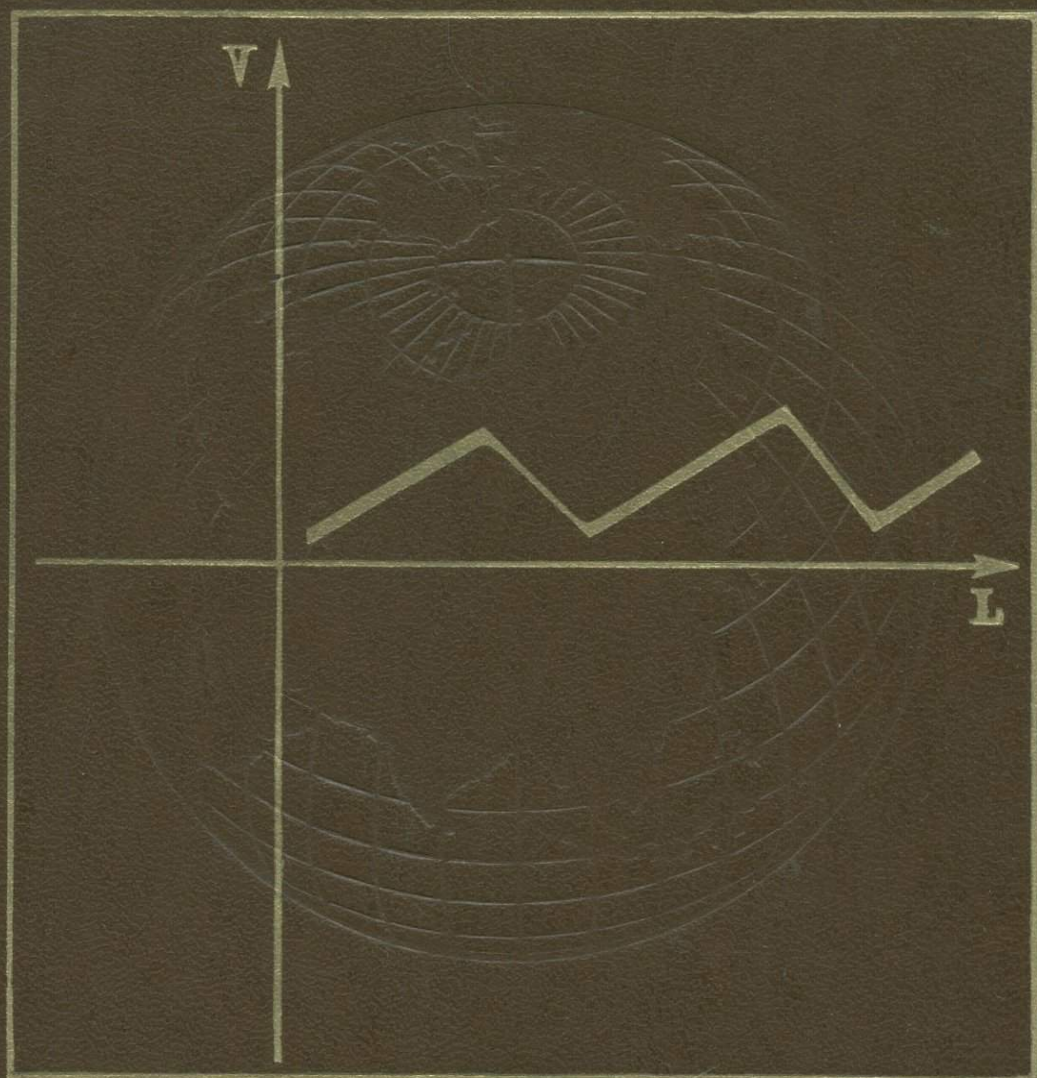


СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ



АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

551.24

2583

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ (исследования на геодинамических полигонах)



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Новосибирск • 1978



В сборник вошли доклады, представленные на V Междуведомственном совещании по изучению современных движений земной коры на геодинамических полигонах, состоявшемся 12—16 мая 1975 г. в Новосибирске. Статьи сгруппированы по полигонам, на которых выполнен комплекс геодезических, геофизических и геолого-геоморфологических исследований.

Книга рассчитана на геодезистов, геологов и геофизиков, а также специалистов, занимающихся геодинамическими проблемами.

Редакционная коллегия:

Ю. Д. Буланже (председатель), Э. Э. Фотиади (зам. председателя, ответственный редактор), В. Н. Гайский (зам. председателя), В. Г. Колмогоров (секретарь), В. А. Ларионов, А. Е. Островский, А. К. Певнев, Е. А. Финько

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПОЛИГОНЫ

Ю. Д. Буланже, А. К. Певнев

О СОСТОЯНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ СССР

Проблема современных движений земной коры представляет интерес для наук, изучающих Землю как планету — геологии, геофизики, географии, геодезии, астрономии, картографии. Исследование данного вопроса в комплексе с изучением изменений силы тяжести во времени, неравномерности вращения Земли, изменений уровня мирового океана, земных и океанических приливов сделает возможным не только констатировать мобильность земной поверхности в настоящее время, но и получить данные о динамике земного шара в целом, об истории развития нашей планеты, а также существенно уточнить наши представления о тектонике верхних частей земной коры. В настоящее время работы в этой области ведутся в основном в двух направлениях.

Во-первых, изучаются вертикальные движения земной коры на больших площадях в целях выяснения устойчивости высотной геодезической сети во времени и установления генетической связи наблюдаемых движений с различными геофизическими полями и тектоническими процессами.

В результате проведенных исследований была создана «Карта вертикальных скоростей современных движений земной коры Восточной Европы». Эта карта — результат коллективного труда ученых Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, Советского Союза, Чехословакии и Югославии. Она создана по данным повторных нивелировок, выполненных геодезическими службами этих стран, и является хорошим примером плодотворности сотрудничества ученых и инженеров-геодезистов, геоморфологов и тектонистов. Идея создания карты, принципы ее построения были высказаны первым президентом СРСР, покойным профессором Ю. А. Мещеряковым.

Во-вторых, исследуются современные движения земной коры на геодинамических полигонах. Их в настоящее время в Советском Союзе более 20 (см. рисунок).

Полигоны расположены в различных геолого-тектонических регионах, что дает возможность сравнить как сами движения земной коры, так и явления, им сопутствующие. На большей части полигонов исследования ведутся комплексно: одновременно с изучением движений земной коры (как правило, геодезическими методами) проводится широкий комплекс геофизических, геологических, геоморфологических исследований.

Значительные геодезические построения созданы в Средней Азии близ городов Алма-Ата, Фрунзе, Ташкент, Душанбе, Ашхабад. Помимо изучения современных движений земной коры, назначение полигонов в установлении генетической связи этих движений с сейсмическими явлениями для разработки методов прогноза землетрясений.

На полигонах систематически ведутся наблюдения за вертикальными и горизонтальными движениями широким арсеналом средств: производится повторное нивелирование, на большинстве полигонов



Расположение полигонов.

установлены чувствительные наклонометры, регистрирующие как приливные вариации наклонов, так и наклоны тектонического происхождения. Для этой цели используются наклонометры с горизонтальными маятниками, с пузырьковыми уровнями и водотрубные наклонометры с базой в 20—30 м. На многих полигонах для регистрации приливных и неприливных деформаций установлены 2- и 3-компонентные деформометры. Для изучения горизонтальных движений применяются комбинированные линейно-угловые построения, позволяющие достаточно уверенно фиксировать горизонтальные смещения геодезических знаков со средней ошибкой порядка $1 \cdot 10^{-6}$.

Наиболее интересные результаты были получены на среднеазиатских полигонах в районе городов Гарм, Алма-Ата и Ташкент. Многократные повторные нивелировки позволили выявить генетическую связь между изменениями скоростей вертикальных движений и деформациями земной коры, связанными с подготовкой к землетрясениям. Установлено, что средние скорости современных вертикальных движений достаточно постоянны. В сейсмоактивных районах наблюдается та же картина. Различие состоит в том, что в сейсмических районах скорости вертикальных движений более дифференцированы в пространстве и существенно варьируют внутри годовых интервалов.

Так, например, на Гармском полигоне при постоянных средних скоростях скорости реперов, расположенных на расстоянии 10 м, существенно различны: у одного репера — первые миллиметры в год, в то время как скорость соседнего репера достигает 15—17 мм/год. В период приближения землетрясений наблюдается увеличение скоростей вертикальных движений. После землетрясений скорость уменьшается и асимптотически приближается к средней скорости движения реперов в спокойное время. Такие закономерности были отмечены ранее на Ташкентском, Алма-Атинском и Гармском полигонах. В период, предшествующий землетрясению, изменение скорости на Алма-Атинском полигоне достигало 60 мм/год.

С целью более детального изучения связи изменения скоростей вертикальных движений с землетрясениями на Гармском полигоне на протяжении 4 лет проводилось повторное нивелирование 8—10 раз в год. Однако при анализе этих данных не удалось получить более надежную корреляционную связь между вертикальными смещениями земной поверхности и сейсмичностью. В результате изучения горизонтальных движений земной коры установлен факт сокращения расстояний

в зоне сочленения горных систем Памира и Тянь-Шаня, который с позиций тектоники плит может трактоваться как сближение этих горных систем. Изучение горизонтальных движений земной коры в этом районе было начато в 1950 г. Тогда была создана сеть микротриангуляции, соединившая подножия двух хребтов: Гиссарского, принадлежащего Тянь-Шаньской системе, и Петра Первого, относящегося к Памиру. Границей между этими двумя хребтами служит глубинный Сурхобский разлом — одно из звеньев грандиозного Гиссаро-Кокшаальского разлома.

Хребты Гиссарский и Петра Первого представляют собой значительные горные сооружения, высоты отдельных пиков превышают 5 км. Протяженность хр. Петра Первого вдоль Сурхобского разлома достигает 300 км. Геолого-тектоническими исследованиями установлено явление надвига хр. Петра Первого в сторону Гиссарского на всем его протяжении. Используя систему угловых и линейных измерений, удалось установить на территории Гармского полигона, что хр. Петра Первого в настоящее время продолжает надвигаться на Гиссарский хребет со скоростью порядка 20 мм/год. Эти результаты подтверждены многократными измерениями, выполненными как классическими методами микротриангуляции, так и измерениями с помощью светодальномеров. Аналогичные данные по величине и направлению были получены и с помощью деформометров. По-видимому, обнаруженное явление хорошо подтверждает горизонтальную мобильность отдельных частей земной коры, в частности, доказывает возможность перемещений Индийской плиты в сторону Евроазиатской.

За последние годы можно видеть огромный прогресс в области экспериментальной проверки основных положений новой глобальной тектоники. Разработка этой проблемы имеет фундаментальное научное значение для развития наук о Земле. Можно утверждать, что если бы были известны закономерности глобальных деформаций всей Земли, то это позволило бы с полной определенностью выбрать наиболее вероятную гипотезу развития нашей планеты. Естественно встает вопрос, где нужно сосредоточить усилия, чтобы с минимальной затратой времени и материальных средств получить новые данные, характеризующие динамику современной Земли.

Как известно, уже полвека назад было положено начало изучению глобальных деформаций земного шара. С помощью астрономических методов делались попытки определить так называемый дрейф континентов. Детальный анализ этого эксперимента, проведенный В. П. Щегловым, показал, что из-за малой точности самого метода ничего нельзя сказать об относительных перемещениях Европы и Северной Америки, меньших, чем 4,6 м. Эти данные получены по результатам наблюдений 1936—1962 гг., т. е. астрономический метод не позволил выявить за указанный период смещения, происходящие со скоростью меньше 18 см/год. Такая точность недостаточна, так как по последним представлениям, смещения литосферных плит могут происходить со скоростью порядка первых сантиметров.

В настоящее время разрабатываются способы, которые дадут возможность осуществить экспериментальную проверку смещений литосферных плит методом повторных измерений расстояний между точками, отстоящими друг от друга на тысячи километров. Предполагается, что измерения столь больших расстояний можно будет проводить с точностью до нескольких сантиметров.

Большой интерес представляет определение скоростей «разбегания» литосферных плит непосредственно в местах их зарождения, т. е. в рифтовых долинах срединных океанических хребтов. Однако отсутствие точных методов подводных геодезических измерений не позволяет осуществить такую проверку в настоящее время.

Вместе с тем в пределах континентальных частей земного шара имеются рифты, которые в глобальной тектонике рассматриваются в качестве зарождающихся границ двух плит. К таким структурам относится впадина Красного моря. В этом случае, создав построения протяженностью в несколько десятков километров, представится возможность в течение нескольких лет получить однозначный ответ о мобильности этого региона. В пределах Советского Союза находится Байкальский рифт. Сейчас создан проект геодезических построений для изучения горизонтальных движений земной коры в этом районе.

С позиций новой глобальной тектоники весьма интересно провести подобные измерения в Курило-Камчатской зоне, расположенной на контакте океанической и континентальной плит. В настоящее время уже положено начало созданию единого Курило-Камчатского суперполигона. Нужно отметить, что обнаруженное сближение хребтов Гиссарского и Петра Первого подтверждает целесообразность создания суперполигонов в Средней Азии с целью установления относительного движения Индийской и Евразийской плит (горные сооружения Гиндукуша, Памира и Тянь-Шаня). Ширина этой зоны порядка 1000 км. Таким образом, экспериментальная проверка скорости сближения потребует измерения расстояния вдоль трассы протяженностью более 1000 км. Несмотря на трудность этих измерений и их недостаточную точность, этот эксперимент вполне реален, так как скорости и направление перемещений могут быть получены из повторных измерений на сравнительно небольших отрезках, где горизонтальные смещения проявляются наиболее контрастно. Подобные работы могут осуществляться только в рамках международных проектов с участием специалистов заинтересованных стран.

Создание Байкальского, Курило-Камчатского, Среднеазиатского суперполигонов — одна из наиболее актуальных задач сегодняшнего дня.

СИБИРЬ И ДАЛЬНИЙ ВОСТОК

Э. Э. Фотиади

СОСТОЯНИЕ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА БАЙКАЛЬСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

Байкальская рифтовая система, представляющая собой протяженную полосовидную зону растяжения земной коры и верхней мантии, относится к невулканическому или слабовулканическому, «щелевому» по Е. Е. Милановскому, типу зон эпиконтинентального рифтогенеза. Она расположена в пределах Байкальского сводового поднятия, протягивается более чем на 2500 км от межгорных впадин Прикосоголья в северо-западной Монголии, через Саяно-Байкальский горный пояс и горные сооружения южной Якутии и достигает Станового нагорья. (Имеются соображения о более восточном продолжении этой системы, захватывающей южный край Алданского щита и область Становика — Джугджура — вплоть до Охотского моря.)

Важнейшие структуры зоны рифта — это системы глубоких, относительно узких грабенов, ветвящихся между горными хребтами. Основу этих грабенов, ограниченных сбросами и выполненными толщами осадочных, а местами вулканических пород, составляют протяженные глубинные разломы. В поперечном сечении «щелевые» рифтовые зоны характеризуются наличием единого осевого грабена либо системы параллельных грабенов, причем с краевыми поднятиями по одну или обе стороны грабена. Подобные типы строения имеют место и в Байкальской рифтовой зоне.

Общезвестна высокая сейсмичность Байкальской зоны, являющейся северным ответвлением Центрального азиатского сейсмического пояса. Очаги многочисленных землетрясений большой интенсивности здесь относятся к коровым и приурочены в большинстве к глубинам 15—25 км и менее. В этих очагах господствуют растягивающие напряжения, ориентированные в основном вкрест грабенов. Преобладающие глубины очагов сильных землетрясений — около 20 км — рассматриваются как свидетельство связи современных быстрых движений с деформациями внутрикорового вещества. Высокая сейсмичность при неглубоком залегании очагов землетрясений, повышенная активность теплового потока, наличие слоя разуплотненного вещества в верхней мантии, приближение изотермической поверхности к поверхности Земли — все это говорит об активном развитии Байкальской рифтовой зоны и в современную эпоху.

На профиле вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали, по данным повторного нивелирования, отчетливо видно, что Байкальский свод, к которому, собственно, и приурочен Байкальский рифт, является значительной по площади зоной резко дифференцированных увеличенных скоростей современных вертикальных движений земной коры.

Перечисленные данные предопределили выбор района Байкальского рифта для геодинамического полигона, на котором с 1966 г. рядом лабораторий геофизического сектора ИГиГ СО АН СССР ведутся комплексные геофизические исследования по изучению глубинного строения

земной коры, осуществляемые с успехом в основном методом ГСЗ. Со-временные движения земной коры изучаются геодезическими (повторное нивелирование), гравиметрическими (относительные определения изменений силы тяжести высокоточными гравиметрами) и магнитными методами (изучение временных вариаций геомагнитного поля). Полученные результаты сейсмических исследований глубинного строения земной коры методом ГСЗ следующие.

1. Земная кора как в прилегающих участках Сибирской платформы и складчатых областей Забайкалья, так и в зоне самого Байкальского рифта имеет слоисто-блоковое строение. Ее мощность изменяется в диапазоне 38—45 км, возрастая в южных областях Забайкалья. Важно подчеркнуть, что средние мощности коры в зоне рифта и на юге Сибирской платформы практически одинаковы. Резкие изменения мощности земной коры приурочены к зонам глубинных разломов, разграничивающих коромантийные блоки (например, в районе о. Ольхон). Существенно увеличенную мощность коры (до 46 км в районе Баргузина) имеют северные районы рифта по сравнению с южными (36 км, в том числе на Селенгинском профиле и др.).

2. В пределах земной коры на глубинах порядка 17—20 км в рифтовой зоне намечается существование волновода — зоны с пониженной скоростью (на 0,2—0,3 км/с). Расслоенность коры здесь значительно менее регулярна, нежели, например, в районах Сибирской платформы.

3. Весьма важно установить распространяющуюся в западном направлении область, которая характеризуется аномально **пониженной** граничной скоростью (7,7—7,8 км/с) по сравнению с ее обычными значениями на границе Мохо (8,1—8,2 км/с) и имеет значительно большую площадь, нежели размеры рифта, намечаемые по геоморфологическим, геологическим данным и проявлениям сейсмичности. Примерная мощность такого коромантийного слоя с пониженной скоростью, полученная по данным расчетов с привлечением сейсмологической информации, составляет 16—17 км. Иначе — глубины до верхней и нижней кромок этого слоя соответственно равны примерно 38 и 55 км. (Напомним, что уменьшение скорости в верхах мантии отмечается и на других участках мировой рифтовой системы.) Существенно, что устанавливаемый аномальный скоростной слой разобшен с собственно астеносферным слоем верхней мантии (так называемым слоем Гутенберга, характеризующимся также пониженными скоростями), который в Прибайкалье по сейсмическим данным залегает на глубине порядка 100 км.

Слой пониженных скоростей рассматриваются как слой разогретого пластичного внутримантийного и внутрикорового вещества, причем собственно слой на 38—55 км — как локальное внедрение по разломам подобного субстрата из астеносферного слоя верхней мантии. Представление о существовании разогретых слоев в верхней мантии и коре Байкальского рифта, как известно, получено также по данным методов магнитовариационного и глубинного магнитотеллурического зондирования. В первом случае был отмечен ряд глубинных зон в коре и мантии с аномальным понижением интенсивности бухтообразных вариаций геомагнитного поля, связанного с уменьшением в этих зонах сопротивления пород вследствие, видимо, их большого разогрева. Во втором случае отмечается ступенчатое воздымание в пределах рифтовой зоны со стороны Сибирской платформы нескольких глубинных проводящих зон, из которых две нижние (на глубинах порядка 100 и 40 км под оз. Байкал) связываются с зонами повышенных температур в верхней мантии и нижней части земной коры. Сама же верхняя такая зона располагается на глубинах 10—12 км под оз. Байкал.

Исполнителями работ ГСЗ высказываются определенные соображения о механизме вертикальных и горизонтальных подвижек в коре Байкальской рифтовой зоны под воздействием глубинных процессов,

воздействовавших на формирование структуры рифтовой зоны. Не настаивая на конкретизации причин и механизма подобных воздействий, нужно подчеркнуть, что устанавливаемые ГСЗ, МВЗ, МТЗ и другими методами (степень расслоения коры, внутрикоровые волноводы, коромантийные сгущения, зоны разогрева и т. д.) проявления резких глубинных неоднородностей мантийного и внутрикорового вещества представляют очевидную ценность для более отчетливого понимания активизации глубинных процессов и ее проявления в современных движениях земной коры Байкальской рифтовой зоны.

В задачи изучения современных движений земной коры на Байкальском полигоне входит не только выявление их наличия, но и исследование их характера, тенденций проявлений и связей с геофизическими, геологическими и тектоническими полями рифтовой зоны. Особой задачей является изучение скачкообразных (быстрых) движений, связанных с интенсивными сейсмическими проявлениями на тех или иных участках Байкальской рифтовой зоны.

В этом направлении комплексное изучение гравитационного и геомагнитного полей предполагает в первую очередь систематические повторные наблюдения за их медленными вековыми изменениями. С этой целью по обеим сторонам озера созданы два специальных профиля — Ангинский на северо-западной и Селенгинский на юго-восточной, на которых периодически проводятся повторные наблюдения с гравиметрами. В последнее время осуществлена связь обоих профилей через оз. Байкал. Помимо пунктов на названных профилях, намечается установка им подобных и на других участках зоны, в первую очередь на профилях через Баргузинский разлом.

Суммарная природа гравитационного поля и в общем небольшие наблюдаемые его колебания во времени, редко превышающие пределы точности самих наблюдений, определяют большие сложности при детальной расшифровке результатов повторных измерений.

Особенно эффективны должны быть здесь наблюдения вариаций геомагнитного поля, поскольку это поле меньше зависит от разнообразия неоднородностей строения земной коры, и поэтому результаты изучения его вариаций при изучении современных перемещений блоков земной коры более информативны. С целью такого исследования на полигоне в течение ряда лет ведутся абсолютные геомагнитные измерения с кварцевыми М-15 и протонными магнитометрами по профилям, пересекающим сейсмогенерирующие разломы. Для Байкальской рифтовой зоны с ее интенсивной сейсмичностью большое значение имеют магнитные исследования, основанные на изучении пьезомагнитного эффекта, т. е. реакции магнитовозмущающих тел на изменения напряжений в земной коре, сопровождающих сейсмические процессы. На это направление магнитных исследований здесь делается особый акцент. Чтобы изучить пьезомагнитный эффект, разработали соответствующие методики и аппаратуру для синхронных наблюдений в полях отчетливо проявляющихся локальных аномалий и в соседних с ними нормальных полях. Представляется, что результаты подобных исследований дадут возможность подойти вплотную к изучению предвестников землетрясений. Помимо исследований на профилях полигона, повторные абсолютные геомагнитные измерения ведутся на значительном протяжении в пределах Баргузинской впадины, а непрерывные геомагнитные наблюдения с помощью магнитовариационных станций ведутся на Гремячинской, Усть-Баргузинской и Бодонской магнитных аномалиях.

Очевидный интерес представляют и данные геотермических исследований, и намечающиеся возможности их использования для прогноза землетрясений. В пределах Байкальского рифта и в прилегающих районах имеется около 40 участков, на которых определены значения теплового потока — на суше с соответствующим использованием разве-

дочных скважин, а в пределах озера с помощью специальной аппаратуры. По данным определений получены общие представления о конфигурации теплового потока в этой зоне. Так, районы Сибирской платформы, примыкающие с запада к Байкальской рифтовой зоне, характеризуются довольно низкими значениями теплового потока ($1,0\text{--}1,1 \text{ мк}\cdot\text{кал}/\text{см}^2\cdot\text{с}$). В самой рифтовой зоне по существующим определениям значения теплового потока высоки и в Байкальской впадине достигают $2,5\text{--}3,5 \text{ мк}\cdot\text{кал}/\text{см}^2\cdot\text{с}$, в Тункинской впадине — $1,8\text{--}2,0$, в Баргузинской — до $2,5\text{--}3,0$, а в Усть-Селенгинской впадине — до $2,9 \text{ мк}\cdot\text{кал}/\text{см}^2\cdot\text{с}$ и т. д. В пределах горных хребтов, окаймляющих эти впадины, значение теплового потока (мало определений) $0,9\text{--}1,4 \text{ мк}\cdot\text{кал}/\text{см}^2\cdot\text{с}$. Несколько большими значениями характеризуются районы Западного Забайкалья ($1,0\text{--}1,8 \text{ мк}\cdot\text{кал}/\text{см}^2\cdot\text{с}$). Существенно, что интенсивно положительная аномалия теплового потока по профилю, секущему оз. Байкал, имеет асимметричную форму, резко обрывается к Сибирской платформе и довольно плавно выполаживается к районам Забайкалья.

Обратимся к наиболее информативным при изучении современных движений земной коры геодезическим данным. В пределах Байкальского геодинамического полигона до 1975 г. выполнено двукратное нивелирование на его Ангинской и шестикратное на Селенгинской линиях. В последние годы повторное нивелирование ежегодно ведется на трех профилях в пределах Баргузинской впадины с ее отчетливо проявляющимися сейсмогенерирующими разломами. Помимо нивелировок на трех профилях, расположенных вкрест разлома, здесь начато изучение горизонтальных перемещений земной коры. С этой целью разбиты две сети микротриангуляций с длиной сторон треугольников $0,5\text{--}2 \text{ км}$: Улюкчиканская и Нестерихинская, рассчитанные на использование помимо методов триангуляции также методов трилатерации и линейно-угловой триангуляции. На Улюкчиканской системе, перекрывающей Улюнскую и Саранхурскую кулисы Баргузинского разлома, в настоящее время заложена центральная система, состоящая из пяти пунктов, на которой выполнены угловые измерения. В дальнейшем число пунктов здесь намечено увеличить вдвое. Нестерихинская система в виде четырехугольника расположена по обе стороны южной кулисы Баргузинского разлома.

Достаточно подробно о результатах геодезических работ говорится в статьях В. Г. Колмогорова, Н. П. Есикова с соавторами (см. наст. сборник). Отметим лишь наиболее характерные данные. Так, из анализа кривой скоростей вертикальных движений по Ангинскому профилю следует, что Байкальское сводовое поднятие поднимается относительно Предбайкальского предгорного прогиба со скоростью до $2,5 \text{ мм}/\text{год}$. Такого же порядка (около $+3 \text{ мм}/\text{год}$) скорость установлена на субпараллельном этому профилю участке линии повторного нивелирования Иркутск — Култук. Нивелирование последней было выполнено в 1942 и 1965 гг. ГУГК при СМ СССР. Отмечаемое увеличение скоростей вертикальных движений земной коры в направлении с северо-запада на юго-восток очень хорошо коррелирует с четко выраженной возрастной зональностью блоков слагающих пород от кембрийских до наиболее древних архейских.

Сопоставление данных повторного нивелирования с гипсометрией рельефа дневной поверхности в тех же районах фиксирует прямую связь между современными вертикальными перемещениями земной коры и дневным рельефом, при этом наибольшие отмечаемые скорости современных движений относятся к наиболее высоким участкам дневной поверхности. Прямые соотношения между рельефом земной поверхности и современными движениями свидетельствуют о том, что последние наследуют движения неоген-четвертичного времени, сформировавшие структурно-тектонический план Прибайкалья.

Для Селенгинской линии данные пятикратного повторного нивелирования позволяют заключить, что на фоне общего опускания Селенгинской впадины в ней отчетливо проявляются короткопериодические вертикальные движения, некоторые из которых, видимо, связаны с землетрясениями, происшедшими вблизи профиля за период 1968—1973 гг.

Кроме того, проанализированы повторные наблюдения ряда линий государственных нивелировок и составлена карта вертикальных движений южной части рифтовой зоны, о чем подробно говорится в статье П. П. Колмогоровой (см. наст. сборник). В ней приведены некоторые данные, в том числе карта скоростей современных движений земной коры в зоне Байкальского рифта и на прилегающих территориях, охарактеризованы некоторые закономерности в распределении этих движений и приведены данные совместного анализа геодезических и геофизических данных при изучении тектонической активности этих районов.

В связи с изучением современных движений в зоне Байкальского рифта значительный интерес представляют недавно начатые Н. П. Есиковым разработки по изучению дилатации и сдвигов в приповерхностной части земной коры с применением методов тензорного анализа и других приемов аппарата механики сплошной среды. Традиционное описание современных движений векторными схемами смещений не дает полного представления об очень важных особенностях этих движений, поскольку они, согласно принципу Коши, в общем случае могут представлять суммарный эффект параллельного переноса участков земной коры и чистой деформации (дилатация плюс формоизменение их вращения) как абсолютно твердых тел, а именно знание этих величин весьма важно при решении геологических и геофизических задач. Величины, имеющие геометрический смысл, с точки зрения теории должны быть инвариантными (неизменными) относительно системы координат, и, в частности, относительно их начала. Поэтому задача описания результатов повторных геодезических наблюдений состоит в определении количественных характеристик современных движений, которые были бы однозначными функциями участков земной коры и были бы свободны от эффектов, обусловленных собственными движениями пункта, принятого за начало координат. С помощью такого анализа можно лучше понять физико-механическую природу современных движений и их связь с глубинным строением земной коры и явлениями сейсмичности.

Из вышеприведенных сведений можно заключить, что наиболее информативные данные, относящиеся к изучению собственно современных движений земной коры, безусловно, относятся к геодезическим исследованиям, в первую очередь к повторным нивелировкам. Однако этого вида работ явно недостаточно. Значительное внимание должно быть уделено исследованию горизонтальных перемещений земной коры и совместному изучению обеих компонент современных движений — вертикальной и горизонтальной. В частности, к настоящему времени составлен проект геодезических работ по изучению современных движений в пределах Баргузинской впадины Байкальского рифта. Проект этот, составленный ЦНИИГАиКом, предприятием ГУГК при СМ СССР и ИЗК СО АН СССР, предусматривает создание в юго-западной части впадины, на площади около 500 кв. км, плано-высотной сети, охватывающей различные неотектонические структуры Баргузинской впадины. Для выявления вертикальных движений там же проложили два нивелирных профиля, пересекающих вкрест простирающую впадину и заглубленных по рекам в ее горные обрамления. Для жесткости профили связаны продольными (по отношению к морфоструктурам) нивелирными ходами, образуя два замкнутых полигона общим периметром около 180 км.

Для выявления горизонтальной составляющей движений земной коры в Баргузинской впадине запроектирована сплошная сеть триангуляции, территориально совпадающая с нивелирными полигонами.

В области геофизических исследований по тематике изучения различных аспектов проявлений современных движений земной коры намечаются следующие работы.

1. Эффективность исследований медленных изменений силы тяжести с целью изучения природы геодинамических процессов в Байкальской рифтовой зоне мы связываем с возможностью постановки в ближайшие годы периодических измерений абсолютного значения силы тяжести с помощью лазерного гравиметра, созданного в ИАиЭ СО АН СССР. Наличие такого гравиметра позволяет поставить комплексные абсолютные и относительные измерения медленных вариаций силы тяжести с реальными перспективами успешного разделения вековых вариаций на глобальную, региональную и локальную составляющие, без чего задача установления природы источников вариаций не может быть решена.

2. Магнитные исследования предполагают продолжение наблюдений вариаций геомагнитного поля.

3. В ближайшие годы намечено подробно изучить поле теплового потока в пределах озера. Что касается изучения этого явления в сухопутной части рифта, то оно практически может быть осуществлено, если поставить специальное бурение скважин. И наконец, особо нужно подчеркнуть необходимость постоянного контакта с сейсмологами при решении ряда задач, связанных с различными проявлениями сейсмического режима в разных районах исследуемого региона.

Естественно, что геодезические и геофизические материалы исследований современных движений земной коры в конечном счете должны глубоко анализироваться с геологических позиций с привлечением данных геоморфологических, геологических и региональных геофизических исследований. Однако подобные вопросы требуют специального и подробного обсуждения.

Усовершенствование существующей и внедрение различных видов новой измерительной аппаратуры (в том числе и автоматизированной) должны быть предметом постоянного внимания.

В заключение следует отметить, что проблема изучения современных движений земной коры в пределах Байкальского рифта и прилегающих районов должна решаться совместными усилиями как институтов СО АН СССР (ИГиГ, ИЗК, ГИ Бурятского филиала), так и предприятиями ГУГК при СМ СССР.

В. Г. Колмогоров

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СОВРЕМЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

С целью выявления специфики тектонического развития Байкальской рифтовой зоны на современном этапе здесь ведутся комплексные геодезические и геофизические исследования, основные задачи которых следующие: 1) выявление пространственных и временных закономерностей современных вертикальных движений земной поверхности в различных геологических районах Байкальской рифтовой зоны; 2) выявление качественных и количественных связей современных движений с сейсмичностью. Для решения этих задач Институтом геологии и геофизики СО АН СССР в 1966—1967 и 1972—1973 гг. в различных районах Байкальской рифтовой зоны построены локальные геодезические сети для систематических наблюдений за современ-

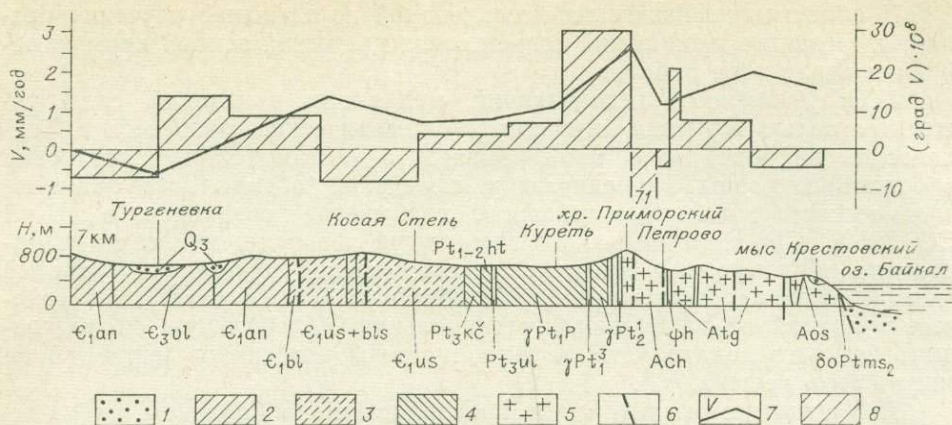


Рис. 1. Разрез геологического строения по профилю линии нивелирования Баяндай — Косая Стень — оз. Байкал.

1 — третичные отложения; 2 — верхний кембрий; 3 — нижний кембрий; 4 — протерозой; 5 — архей; 6 — разломы; 7 — кривая скоростей современных вертикальных движений; 8 — горизонтальный градиент скорости вертикальных движений.

ными движениями земной коры — Ангинская, Селенгинская и Баргузинские линии повторного нивелирования.

Ангинская линия пересекает район, отличающийся разнообразным геологическим строением. В структурном отношении он расположен в пределах северо-западного крыла крупного антиклинория, ось которого проходит по оз. Байкал к юго-востоку от о. Ольхон. В направлении с юго-востока на северо-запад четко выражена возрастная зональность блоков: на юго-востоке выходят наиболее древние породы архея, слагающие Ольхонский блок; по линии разлома этот блок в направлении к северо-западу сменяется протерозойским блоком Приморского хребта. Породы протерозоя постепенно погружаются к северо-западу и перекрыты в пределах Предбайкальского прогиба осадочными толщами нижнего палеозоя (кембрий), мощность которых по направлению к северо-западу возрастает [11].

Рассматриваемая линия пересекает следующие основные геоморфологические структуры: Прибрежную возвышенность, Маломорское продольное понижение, Приморский хребет, Онотскую возвышенность, Манзурское продольное понижение. Густота реперов максимальна в юго-восточной части территории, прилегающей к Байкалу, где следует ожидать наибольшую дифференцированность вертикальных движений, наибольшие их скорости и максимальные градиенты. Профиль повторного нивелирования закреплен 14 реперами, из которых 11 грунтовых (фундаментальных 2-го типа) и 3 скальных. Грунт плотный, в основном суглинок с примесью обломков твердых пород.

Первое нивелирование Ангинской линии проводилось в 1967 г., повторное — в 1972 г. Точность обеих нивелировок характеризуется средними квадратическими ошибками на 1 км хода соответственно $\eta_1 = \pm 0,39$ мм/км и $\eta_2 = \pm 0,46$ мм/км.

Наиболее вероятную картину вертикальных движений за 1967—1972 гг. отражает кривая их скоростей (рис. 1). Из сравнения результатов нивелирования разных лет видно, что группа реперов, расположенная в пределах Байкальского антиклинория, поднимается относительно Предбайкальского предгорного прогиба со скоростью до 2,3 мм/год. Такого же порядка (около 3 мм/год) получена скорость поднятия по результатам нивелирования 1-го класса в 1942 и 1965 гг. участка Иркутск — Култук, субпараллельного рассматриваемой линии. В структурном отношении Ангинская линия и участок Иркутск — Култук

тук идентичны: их начальные пункты находятся в зоне Предбайкальского предгорного прогиба, а конечные пункты приурочены к зоне Байкальского антиклинория. При сопоставлении скоростей, полученных за 5- и 23-летний периоды для разных участков одних и тех же структур, вытекает вывод о возможном равномерном поднятии Байкальского свода [3].

Наиболее мобильными и активными в сейсмическом отношении структурами в рифтовых зонах являются рифтовые впадины и ограничивающие их глубинные разломы, причину образования которых некоторые исследователи видят в растяжении земной коры [8, 9]. К подобным впадинам, названным Н. А. Флоренсовым впадинами байкальского типа, относятся Усть-Селенгинская и Баргузинская, непосредственно связанные с развитием Байкальской рифтовой системы [10]. Об их продолжающемся формировании свидетельствуют сравнительная геологическая молодость образования, четкая морфологическая выраженность в рельефе, интенсивность неотектонических движений, высокий сейсмический потенциал.

Селенгинская линия протяженностью 36 км расположена вкострости основных структур Усть-Селенгинской депрессии: от Фофоновской кристаллической перемычки доходит, пересекая Кударинскую ступень, почти до Дельтового прогиба (рис. 2). С 1968 г. ежегодно (за исключением 1971 г.) выполняется прецизионное нивелирование. Оценка качества измерений производится по формулам:

$$\eta^2 = \frac{1}{4n} \left[\frac{d^2}{r} \right] \text{ и } \eta^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_j} \sum_{i=1}^k \frac{(h_{ij} - \bar{h}_j)^2}{k(k-1)} \left[1 + \frac{2}{k} \sum_{i=1}^{k(k-1)} \rho_{i, k-i} \right],$$

где η — средняя квадратическая ошибка нивелирования 1 км двойного хода, r_j — длина секции в км, k — число измерений превышения одной секции (в нивелировании 1-го класса $k=8$), $\rho_{i, k-i}$ — коэффициент корреляции между измеренными превышениями h_i и h_{k-i} , n — число секций в линии. Вычисленные по этим формулам значения η находятся в пределах от $\pm 0,3$ до $\pm 0,6$ мм/км.

Из анализа результатов шестикратного нивелирования Селенгинской линии видно общее систематическое опускание Усть-Селенгинской впадины, обусловленное, очевидно, интенсивным развитием Байкальского рифта. На фоне этого опускания имеют место короткопериодические вертикальные движения. Это особенно четко проявляется при сравнении нивелировок, выполненных в периоды 1968—1970, 1970—1972 и 1972—1974 гг. (рис. 3, а). Объяснить такое изменение высот реперов короткопериодическими колебательными движениями земной коры с периодом 8—10 лет, названными В. В. Ламакиным микропульсациями [6], пока не представляется возможным.

С другой стороны, общая тенденция к опусканию могла быть нарушена землетрясениями, происшедшими недалеко от профиля в 1968—1972 гг. Из выбранной группы сильных землетрясений (с $K=9$) по нашим предположениям только одно, свершившееся 20 февраля 1971 г. с $M=4$ ($K=11$) и имевшее очаг в пределах блока, на котором расположены нивелирные реперы, оказало влияние на изменение характера движений [1]. Предполагая далее, что опускание реперов № 11—16 происходит со скоростью 1,5—4 мм/год соответственно, приблизительную величину положительного смещения их после землетрясения можно оценить значениями 3,5—15 мм.

Для изучения влияния сильных землетрясений на положение реперов в Баргузинской впадине построены Гремячинская (5 км), Нестерихинская (2 км) и Яриктинская (3,5 км) линии нивелирования, которые пересекают Улюнскую и Саранхурскую кулисы сейсмогенерирую-

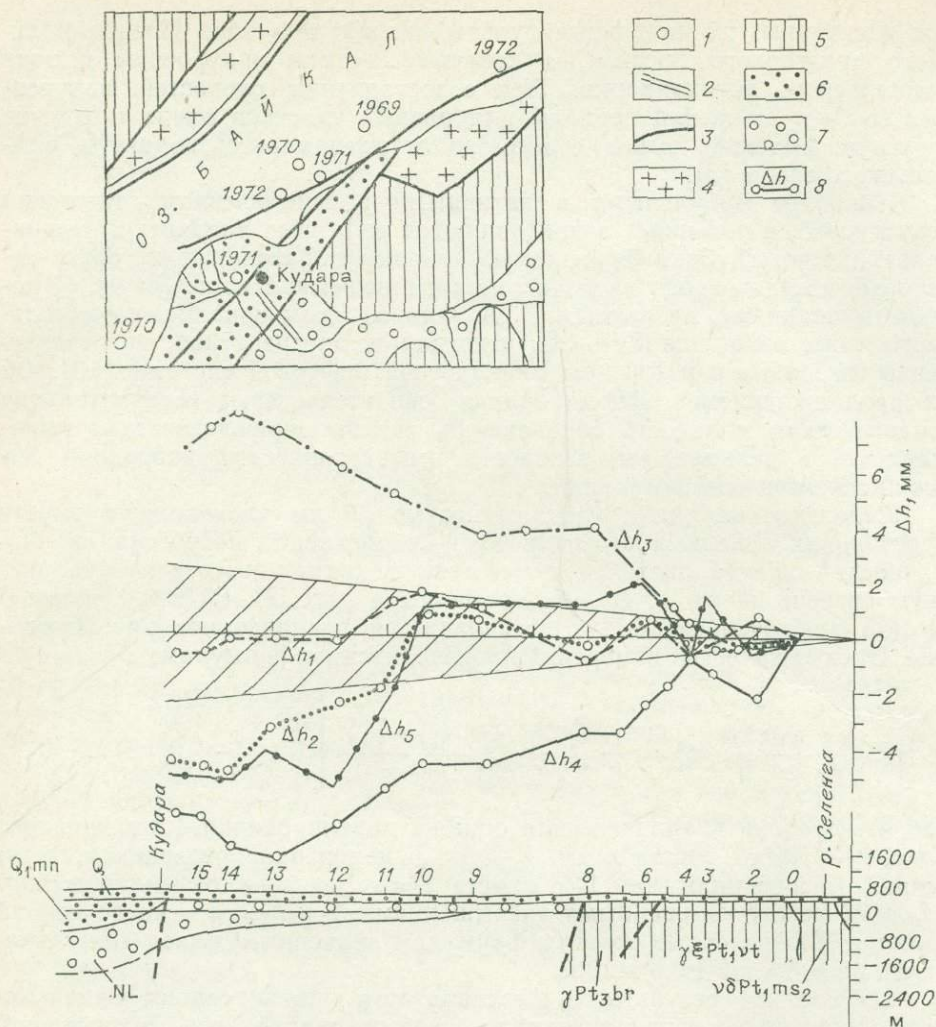


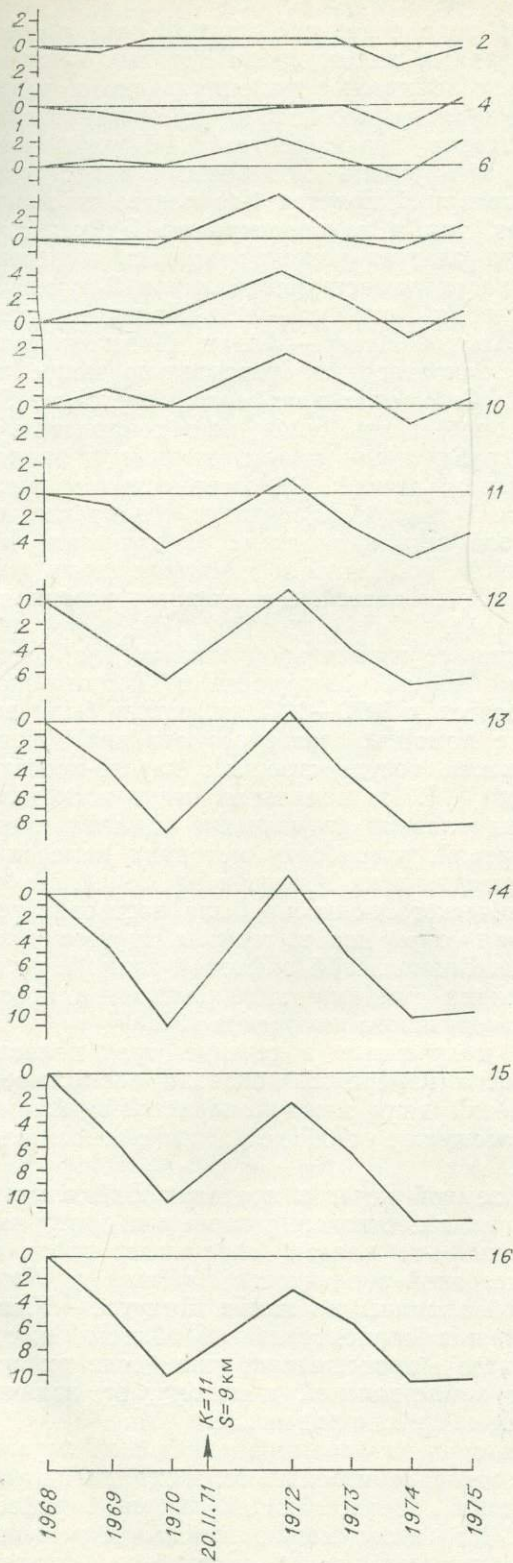
Рис. 2. Профиль Селенгинской линии многократного нивелирования.

1 — эпицентры землетрясений с $K=11$; 2 — линии повторного нивелирования; 3 — разломы; 4—7 — отложения (4 — архейские, 5 — протерозойские, 6 — четвертичные, 7 — неогеновые); 8 — изменение высот точек земной поверхности за 1968—1969 гг. (Δh_1), 1969—1970 гг. (Δh_2), 1970—1972 гг. (Δh_3), 1972—1974 гг. (Δh_4), 1968—1975 гг. (Δh_5).

щего Баргузинского разлома, отделяющего Передовой и Баргузинский хребты от самой впадины. С июня 1973 по октябрь 1974 гг. эти линии неоднократно нивелировались, при этом дважды сразу же после землетрясений (в ноябре 1973 и октябре 1974 гг.). Полученные разности высот указывают на то, что реперы изменили свое положение после этих землетрясений, имевших эпицентры в отрогах Икатского хребта (октябрь 1973 г., $K=11$) и на берегу Чивыркуйского залива (сентябрь 1974 г., $K=11$) (рис. 3, б, в). Результаты систематических наблюдений в Усть-Селенгинской и Баргузинской впадинах показывают, как сложна и изменчива картина смещения нивелирных реперов в сейсмических зонах.

Сравнение повторных нивелировок 1-го и 2-го класса позволили получить первые сведения о скоростях современных вертикальных движений земной коры в южной части Байкальской рифтовой зоны [5]. Естественно, что для такой громадной и разнородной в неотектоническом отношении территории существующая сеть высокоточного

а



б

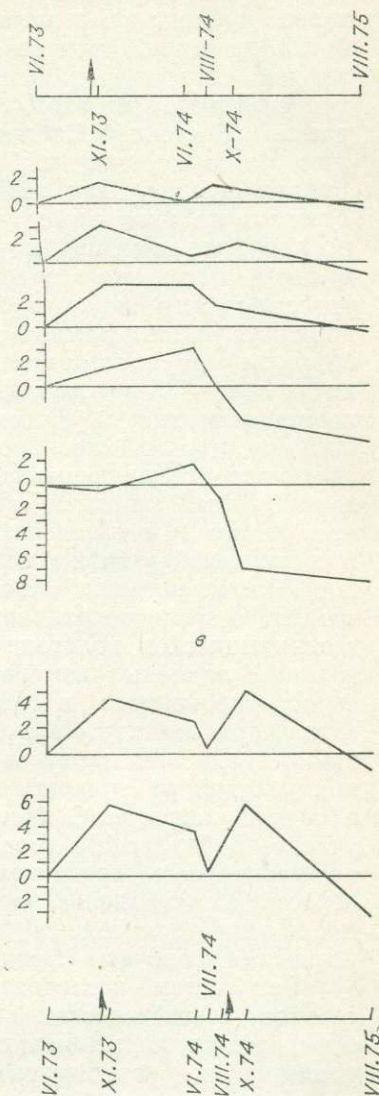


Рис. 3. Изменение высот реперов по профилям во времени:

а — Селенгинского за 1968—1975 гг., б — Гремячинского за июнь 1973 — август 1975 гг.; в — Нестерихинского за июнь 1973 — август 1975 гг.

и точного нивелирования явно недостаточна. Комплексное изучение физических процессов в земной коре и верхней мантии, решение различных теоретических и прикладных задач, среди которых исключительно актуальными являются сейсмическое районирование и разработка проблемы предсказаний землетрясений, требует сгущения нивелирной сети и сокращения сроков перенаблюдений. Прежде всего представляется необходимым разукрупнить создаваемый в настоящее время в Восточной Сибири нивелирный полигон 1-го класса по профилям, пересекающим как вкрест, так и по простиранию Байкальскую рифтовую зону. Для этой цели следует реконструировать и перенаблюдать по программе 1-го класса существующие линии 2-го класса по направлениям Витим — Зилово и Усть-Кут — Усть-Нюкжа с последующим выходом на трассу Большой Невер — Алдан. Проектируемые трассы своими концами будут опираться на относительно менее подвижные участки земной коры (Сибирская платформа, Восточнее Забайкалье) и последовательно пересекать зоны неоген-четвертичной активизации и рифтогенеза с различными типом, темпом и знаком неотектонических и современных движений. Они, совместно с имеющимися линиями нивелирования 1-го класса, создадут основу для последующего сгущения нивелирной сети и перехода от изучения движений земной коры по отдельным профилям к их площадному распределению и составлению карты скоростей современных вертикальных движений земной коры (рис. 4).

Первые попытки определения горизонтальной компоненты современных тектонических движений земной поверхности на Байкальском геодинамическом полигоне относятся к 1970—1972 гг., когда были выполнены линейные измерения с помощью лазерного эталона длины, сконструированного в Харьковском государственном научно-исследовательском институте метрологии [7]. На начальном этапе исследований основное внимание было направлено на изучение влияния внешних условий на точность измерений, разработку методики измерений и оценки точности. С целью решения этих вопросов на Селенгинском участке Байкальского геодинамического полигона была построена геодезическая сеть, представляющая собой два вытянутых треугольника, пересекающих один из разломов Байкальской рифтовой зоны. Пункты наблюдений закреплены бетонными тумбами, заложенными в протерозойские и плотные породы четвертичного комплекса [3].

Результаты исследований, полученные в течение трех полевых сезонов, статистическая обработка измерений показали возможность обнаружения медленных изменений длин между опорными пунктами, удаленными друг от друга на расстояние от 0,7 до 1,9 км с относительной погрешностью $(10 \div 5) \cdot 10^{-7}$.

Горизонтальные движения земной коры в пределах Байкальской рифтовой зоны можно выявить из сопоставления первых и повторных наблюдений рядов триангуляции 1-го класса, следующих вдоль ее северо-восточного фланга (от северной оконечности Байкала до Усть-Нюкжи) и поперек Байкальской впадины по линии Иркутск — Улан-Удэ. Указанные ряды охватывают эпицентральные области шести землетрясений (от 8 до 10 баллов), происшедших уже после их создания. Механизм очагов этих землетрясений предполагает наличие горизонтальной составляющей смещений по разрывам.

Для количественной оценки горизонтальных перемещений берегов Байкала желательно было бы создание небольшого звена высокоточной линейно-угловой триангуляции, пересекающей озеро в районе о. Ольхон — п-ова Святой Нос. Для этого можно использовать существующие пункты триангуляции опорных рядов 2-го класса. В неотектонической структуре Байкальской впадины этот район представляет диагональную внутривпадинную перемычку (блоковые поднятия), от-

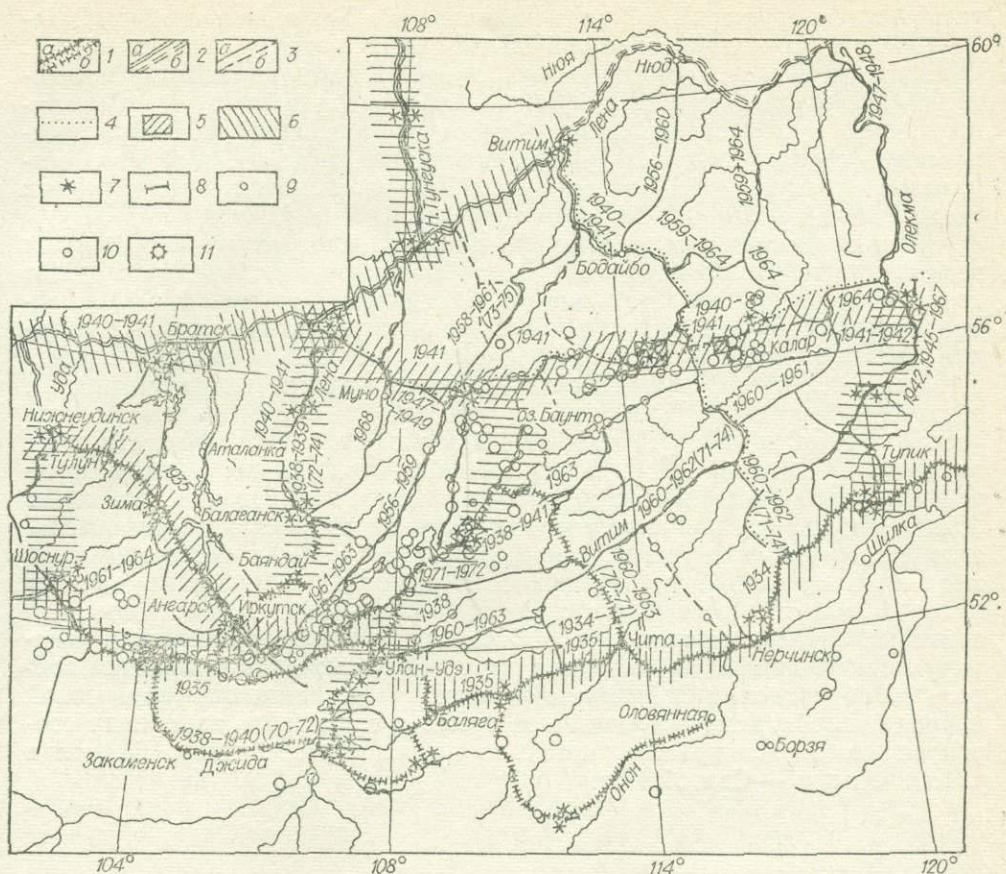


Рис. 4. Схема геодезической изученности Байкальской рифтовой зоны.

1 — линии, на которых выполнено повторное нивелирование (а — 1-го и б — 2-го классов); 2 — линии нивелирования 1-го класса (а — существующие, б — проектируемые); 3 — линии нивелирования 2-го класса (а — существующие, б — проектируемые); 4 — рекомендуемые линии нивелирования 1-го класса для изучения современных движений земной поверхности; 5 — проектируемые геодинамические полигоны с комплексом геодезических и геофизических измерений; 6 — ряды триангуляции 1-го класса и время наблюдений; 7 — астропункты; 8 — базы; 9—11 — эпицентры землетрясений на 1971 г. (9 — менее 7 баллов, 12 кл.; 10 — 8—10 баллов, 13—15 кл.; 11 — 10 баллов, 16 кл.).

деляющую северную котловину от южной, и характеризуется повышенной сейсмической активностью. Перемычка контролируется мощными сейсмогенерирующими разломами, подчеркнутыми глубинными геофизическими аномалиями [2]. Все это дает основание предполагать здесь существование горизонтальных движений.

Огромное значение имеет исследование современных движений земной коры на северо-восточном фланге Байкальской рифтовой зоны, ставшем ареной крупного инженерно-технического строительства (Удоканский горнообогатительный комбинат, Байкало-Амурская магистраль и др.). Здесь уже начат комплекс исследований, среди которых большое значение приобретают работы по выяснению сейсмогеологических условий проявления землетрясений, изучению сейсмичности, проведению обоснованного сейсмического районирования восточного фланга Байкальской рифтовой зоны и прилегающих частей Станового поднятия. Особо важны, по нашему мнению, работы по изучению режима современных движений земной коры на сейсмоопасных участках БАМа — участках, пересекающих очень сейсмоактивные рифтовые впадины с большими амплитудами вертикальных и горизонтальных современных и неотектонических движений (Верхне-Ангарская, Чарская, Муйская и другие впадины), и в районах строительства крупных дол-

госрочных сооружений (Северо-Байкальский 5-километровый и Северо-Муйский 15-километровый туннели, мост через р. Витим и др.). Очевидно, что назревает вопрос о проведении здесь постоянных наблюдений за характером деформаций земной поверхности с целью предупреждения и предотвращения возможных нарушений инженерно-технических сооружений (создание специальной службы). Все это, безусловно, требует серьезно продуманной постановки высокоточных геодезических работ.

В заключение следует отметить следующие основные направления геодезических исследований в Байкальской рифтовой зоне: 1) с целью изучения вертикальных движений в Байкальской рифтовой зоне и сопредельных с ней областях необходимо перекрыть существующие линии нивелирования 2-го класса нивелированием 1-го класса, пересекающим последовательно зоны с различными типом, темпом и знаком неотектонических и современных движений; 2) составить карты скоростей современных вертикальных движений земной поверхности и их градиентов всей территории Байкальской рифтовой зоны с целью дальнейшего использования их при сейсмическом районировании, что имеет большое практическое значение для районов интенсивного строительства и освоения природных ресурсов; 3) для изучения связи скоростей медленных движений с сейсмичностью необходимо повысить частоту измерений на существующих линиях Байкальского геодинимического полигона, а также построить подобные профили на других сейсмогенерирующих разломах Байкальской рифтовой зоны; 4) для решения вопроса об образовании Байкальской впадины (ее сдвигово-раздвиговой природе) необходимо в ближайшее время организовать измерения сторон опорного ряда триангуляции 2-го класса пересекающего Байкал в районе Ольхон — Святой Нос.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровик Н. С., Гайский В. Н., Колмогоров В. Г., Ларионов В. А., Мишарина Л. А., Фотиади Э. Э. Исследование характеристик поля упругих напряжений в Байкальской рифтовой зоне. — *«Геол. и геофиз.»*, 1974, № 11.
2. Зорин Ю. А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. М., «Наука», 1971.
3. Колмогоров В. Г., Авдеев Н. С. Возможности использования лазерного дальномера для изучения горизонтальных перемещений земной поверхности. — В кн.: Методические вопросы исследования современных движений земной коры. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975.
4. Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П. Результаты повторного нивелирования на Ангинском профиле. — В кн.: Методические вопросы исследования современных движений земной коры. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975.
5. Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П., Юдин В. С., Кочетков В. М., Курушин Р. А., Киселев А. А. Перспективы изучения современных движений земной коры в Байкальской рифтовой зоне. — В кн.: Методические вопросы исследования современных движений земной коры. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975.
6. Ламакин В. В. Неотектоника Байкальской впадины. М., «Наука», 1968.
7. Сикора С. В., Лукин И. В. Актуальные метрологические проблемы дальнометрии. — В кн.: Украинская республиканская научно-техническая конференция, посвященная 50-летию метрологической службы УССР. Харьков, 1972.
8. Солощенко В. П., Тресков А. А., Жилкин В. М., Зорин Ю. А., Коростин П. П., Курушин Р. А., Павлов О. В., Пшеничников К. В., Фомина Е. В., Хилько С. В., Хромовских В. С., Шмотов А. П. Сейсмотектоника и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья. М., «Наука», 1968.
9. Шерман С. И., Медведев М. Е., Ружич В. В., Киселев А. И., Шмотов А. П. Тектоника и вулканизм юго-западной части Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск, «Наука», 1973.
10. Флоренсов Н. А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1960.
11. Фотиади Э. Э., Каратаев Г. И., Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П., Ларионов В. А., Мурзина Г. А., Черемисин В. Г., Сардарян А. С. Байкальский геодинимический полигон. Новосибирск, «Наука», 1970.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

Поведение современных вертикальных движений земной коры в Байкальской рифтовой зоне и прилегающих к ней районах Западного Забайкалья изучено геодезическим методом. С этой целью кроме данных повторного высокоточного нивелирования линии Кинель — Курган — Чита... использована сеть точного нивелирования, в пределах которой повторное нивелирование проведено на пяти замкнутых полигонах: Култук — Жемчуг — Кяхта — Улан-Удэ — Култук (I), Улан-Удэ — Баляга — Кяхта — Улан-Удэ (II), Улан-Удэ — Могойто — Чита — Улан-Удэ (III), Чита — Оловянная — Букукун — Хилок — Чита (IV) и Кайдалово — Чита — Нерчинск — Оловянная — Кайдалово (V) (рис. 1). Для изучения современных движений в указанном регионе использованы также данные систематических наблюдений на профилях: Ангинском (Зап. Прибайкалье) и Селенгинском (Вост. Прибайкалье), заложенных ИГиГ СО АН СССР. Общая протяженность анализируемых линий нивелирования составляет около 7 тыс. км. Они частично окаймляют и, что особенно ценно, в различных местах пересекают южную половину Байкальской рифтовой зоны и Забайкалья. Интервалы времени между повторными нивелировками изменяются от 1 года до 5 лет для линий ИГиГ и от 20 до 30 лет для линий государственной сети.

Основной методический вопрос изучения современных движений земной коры (СДЗК) — тщательный анализ и объективная оценка результатов нивелирования, необходимые для доказательства достовер-

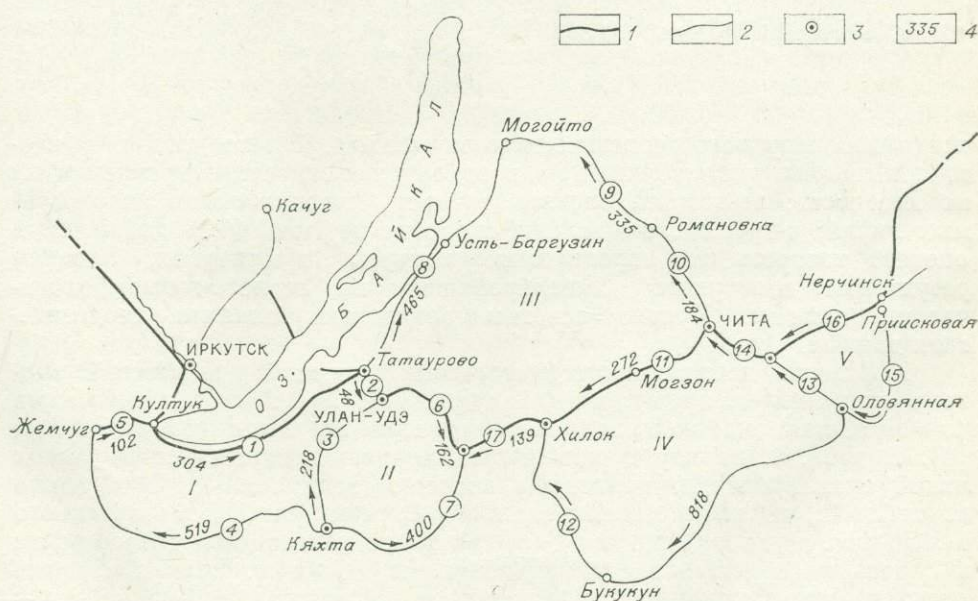


Рис. 1. Полигоны повторного нивелирования на территории Байкальской рифтовой зоны и Забайкалья.

I — линии нивелирования 1-го класса и 2 — 2-го класса; 3 — узловая точка; 4 — длина линии нивелирования, км.

f — невязка скоростей, мм/год; P — периметр полигона, км; 1,0% — процент разрыва линий повторного нивелирования в полигоне (I: $f = +6.6$; $P = 1185$; 0,8%. II: $f = -1.2$; $P = 780$; 1,3%. III: $f = -4.0$; $P = 1605$; 1,0%. IV: $f = +2.4$; $P = 1372$; 0,0%. V: $f = +0.6$; $P = 2554$, 0,0%).

Таблица 1

Характеристика линий повторного нивелирования

№ п/п	Линия нивелирования	Длина, км	Класс нивелирования	Год нивелирования	Средние квадратические ошибки нивелирования, мм/год		Накопленные разности превышений, мм
					случайные, η	систематические, σ	
1	Красноярск — Иркутск	1115	1	1937—1943	$\pm 0,75$	$\pm 0,11$	+183,5
2	Иркутск — Чита	1266	1	1962—1965	0,68	0,04	+49,2
				1937—1939	0,79	0,02	
3	Иркутск — Качуг	263	2	1963—1966	0,64	0,02	+90,1
				1937	1,50	0,15	
4	Улан-Удэ — Кяхта	218	2	1971	0,78	0,11	—0,6
				1937	1,20	0,14	
5	Кяхта — Баляга	400	2	1970—1971	0,92	0,09	+51,6
				1936	1,44	0,15	
6	Култук—Жемчуг—Кяхта	621	2	1971	1,03	0,11	—198,8
				1938—1940	1,20	0,25	
7	Култук — Жемчуг Жемчуг — Кяхта	102	1	1969—1970	0,35	0,02	+306,8
		519	2	1972	1,05	0,12	
8	Татаурово — Могойто	465	2	1938—1941	1,20	0,25	—175,5
		519	2	1970—1972	0,90	0,10	
9	Хилок — Оловянная	818	2	1943—1944	1,27	0,11	—111,9
				1971—1972	0,56	0,15	
10	Кайдалово — Мирный— Приисковый	396	2	1937—1938	0,90	0,16	—64,8
				1971	0,89	0,13	
11	Ангинский профиль	80	1	1956—1958	1,43	0,16	+11,8
				1971—1974	0,68	0,11	
12	Селенгинский профиль	36	1	1967	0,39	0,02	—11,8
				1972	0,46	0,02	
				с 1968 ежегодно по 1975	0,43	0,02	

ности используемого геодезического материала. В этом плане, во-первых, выполнен анализ линий по признаку надежности закрепления их на местности; во-вторых, оценена точность нивелирования используемых линий; в-третьих, вычислены скорости вертикальных движений и оценена точность их определения; наконец, в-четвертых, оценены результаты повторного нивелирования по геолого-геоморфологическим данным. Кратко осветим результаты анализа геодезических данных.

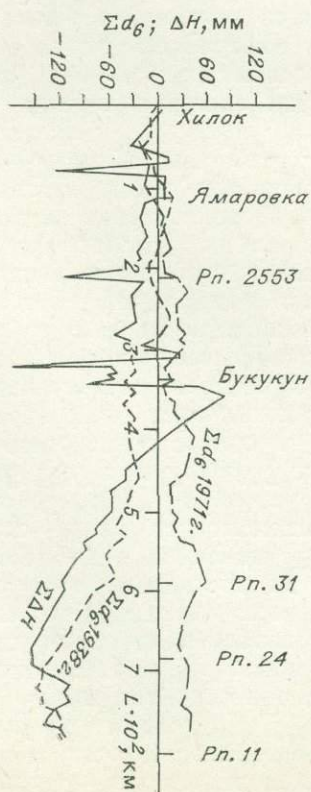
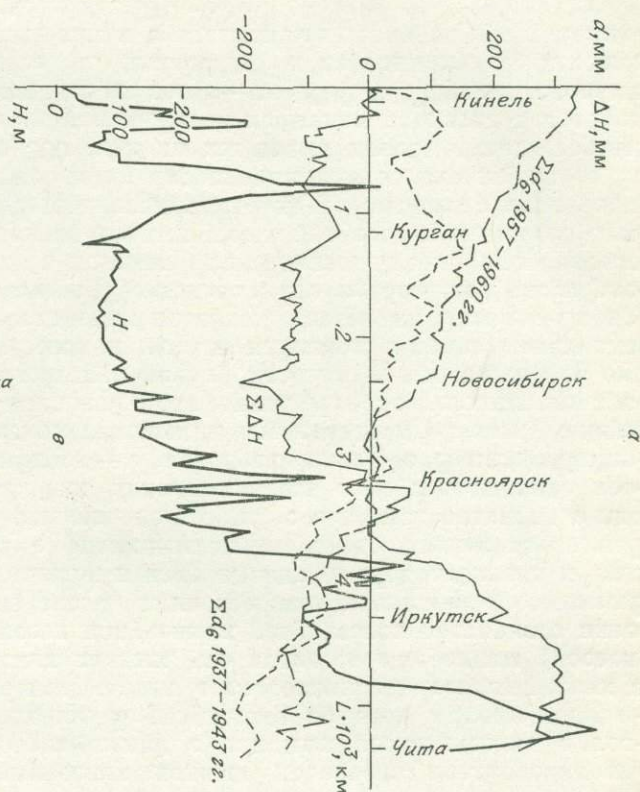
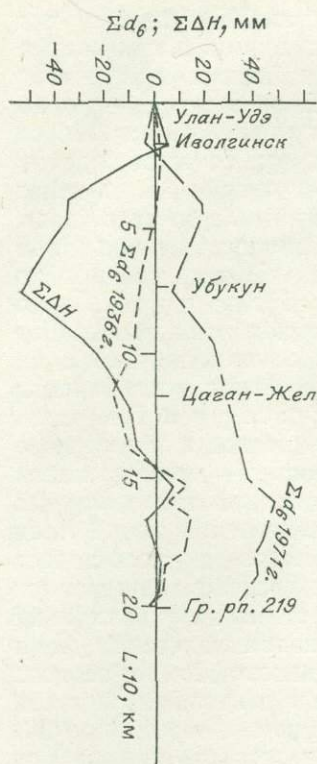
1. Степень достоверности полученных значений превышений оценена средними квадратическими случайными (η) и систематическими (σ) ошибками наблюдения, вычисленными по известным формулам [4]. В табл. 1, наряду с основными характеристиками используемых линий нивелирования, приведены значения этих ошибок. Как видно из таблицы, точность нивелирования сибирских линий, выполненного в 1970-х гг. по программе как 1-го, так и 2-го класса, повысилась почти в 2 раза по сравнению с нивелированием 1940-х гг. Если в среднем точность нивелирования, выполненного по программе 1-го класса в 1940—1960 гг., определяется значениями средних квадратических ошибок, равными $\eta = \pm 0,75$ мм/км, $\sigma = \pm 0,02$ мм/км, то аналогичные ошибки нивелирования 1970-х гг. доведены до таких величин: $\eta = \pm 0,40$ мм/км, $\sigma = \pm 0,02$ мм/км. Нивелирование линий, выполненное по программе 2-го класса в 1930—1940 гг. характеризуется ошибками

$\eta = \pm 1,2 - 1,4$ мм/км и $\sigma = \pm 0,25$ мм/км, а подобное нивелирование 1970-х гг. выполнено с ошибками: $\eta = \pm 0,8 - 1,0$ мм/км, $\sigma = \pm 0,13$ мм/км.

Чтобы получить представление о характере и величине систематических ошибок нивелирования каждой линии, на рис. 2 приведены графики накопления разностей средних превышений, полученных из прямого и обратного хода первого и повторного нивелирования. На рис. 2, а изображен график накоплений разностей превышений по «опорному» профилю нивелирования Кинель — Курган — Красноярск — Чита, пересекающему с запада на восток Западную и Восточную Сибирь. Графики накопления разностей средних превышений (Σd_6 1957 г. и Σd_6 1937 г.) и график изменения превышений (ΔH) построены относительно г. Красноярска. Обоснование выбора нулевого репера будет дано ниже. Здесь же отметим, что при анализе графиков значительных величин остаточных систематических ошибок по той части профиля, которая расположена в пределах Западной и Восточной Сибири, не обнаружено. Общее накопление систематических ошибок в районе г. Читы равно 60 мм, в то время как накопление изменений превышений достигает 320 мм.

На других линиях повторного нивелирования (см. рис. 2) эти ошибки накапливаются только на отдельных относительно коротких участках линий, например Иркутск — Жердовка (см. рис. 2, е), Утаты — Жемчуг (см. рис. 2, д), Средний Шергольджин — Баляга (см. рис. 2, ж).

Анализ качества нивелирования, сравнение вычисленных (реальных) ошибок нивелирования с техническими допусками наряду с результатами проработки фондовых материалов о закладке реперов, а также частичного нашего полевого обследования трасс позволили сделать вывод о возможности использования указанных выше линий повторного нивелирования для изучения СДЗК. Кроме того, для более надежной оценки геодезических данных проверена согласованность полученных изменений превышений с данными геологических и геоморфологических наблюдений. В результате по всем линиям нивелирования выявлена в общих чертах согласованность геодезических и геолого-геоморфологических данных, что является еще одним (косвенным) критерием надежности полученных результатов повторного нивелирования. Как видно из рис. 2, а, на графике изменения превышений нарастание скоростей поднятия в направлении от Новосибирска к Чите согласуется, во-первых, с размещением крупных элементов земной коры рассматриваемого региона, во-вторых, с историей развития в них тектонических движений. Так, западная часть всей трассы нивелирования Курган — Новосибирск — Красноярск идет по Западно-Сибирской плите, в тектоническом отношении представляющей погруженную часть молодой Урало-Сибирской платформы. Начало устойчивого прогибания этой плиты относится к началу мезозоя, и продолжалось оно на протяжении всего мезозоя и начала кайнозоя. Анализ материала, использованного при составлении новейшей тектоники Западно-Сибирской плиты и ее обрамления [2], показал, что на большей части рассматриваемой территории в новейший тектонический этап преобладали поднятия, за исключением отдельных узких прогибов и желобов. Суммарные амплитуды неотектонических структур, например верхнеолигоцен-четвертичных движений на территории плиты, варьируют от 50 до 100, реже от 200 до 300 м. В то же время краевые части горных сооружений Урала, Казахстана и Алтая испытали поднятие в среднем на 300—500 м, а центральные их зоны — до 1000 м. Другими словами, Западно-Сибирская плита по отношению к ее горному обрамлению в новейшее время, так же как и в отдаленные периоды, представляла значительно погруженную область.



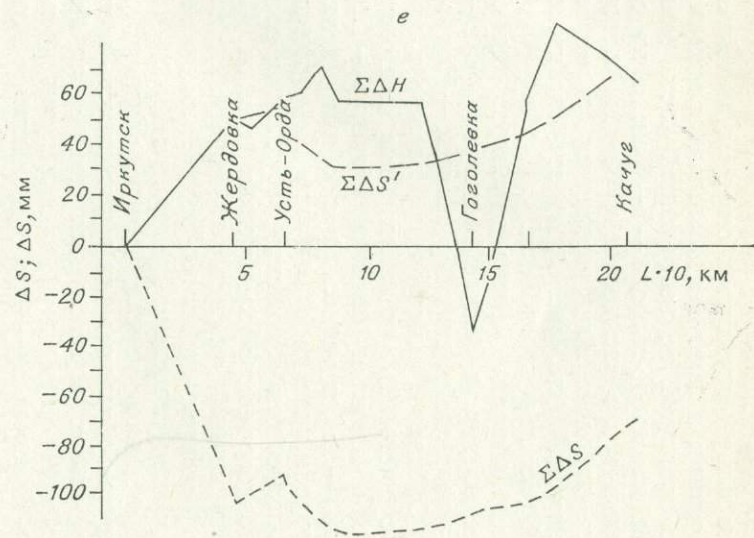
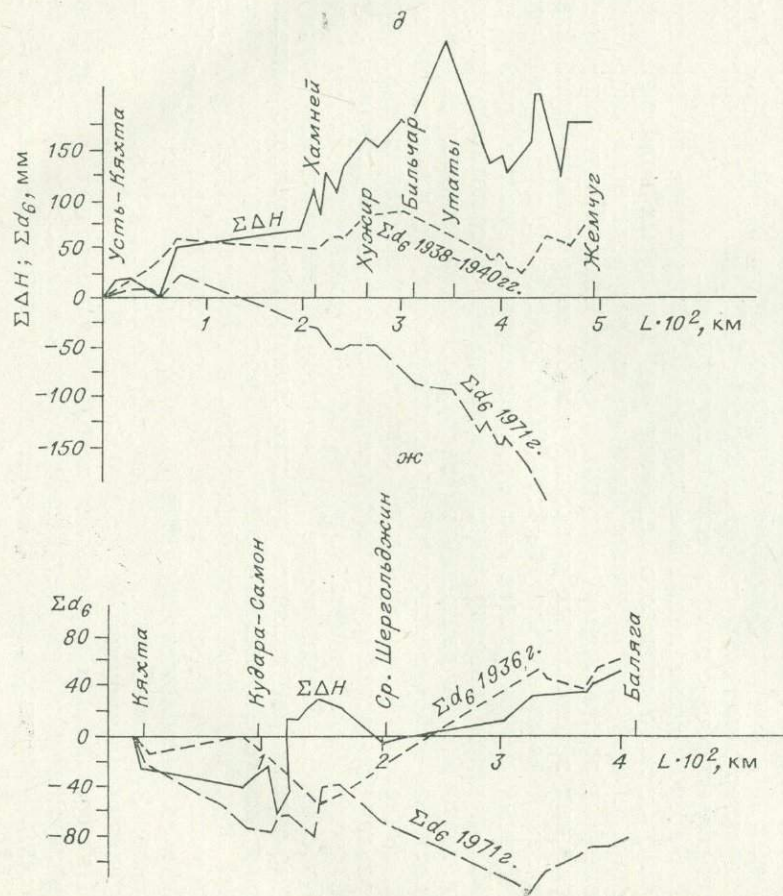


Рис. 2. Накопление разностей средних превышений.

ΔH — изменение превышения, мм; H — высота точки земной поверхности, м; Σd_6 — разность средних превышений, полученных из прямого и обратного ходов первого и повторного нивелирования, мм; ΔS — величина остаточных систематических ошибок двукратного нивелирования, мм.

Сейчас по кровле доюрского фундамента эта плита в крупном плане представляет гигантскую чашу, открытую к северу и выполненную морскими, прибрежно-морскими и континентальными отложениями мезокайнозоя. В наиболее прогнутой ее центральной части мощность чехла достигает 3—4 км, на северо-востоке — 5—6 км, а на севере — еще более. Вся центральная и в значительной степени южная части плиты характеризуются заболоченным равнинным рельефом. На графике изменения превышений (см. рис. 2, а) эта гигантская впадина проявляется обширной областью прогибания.

Если западная часть рассматриваемой линии нивелирования совпадает с низменностью, то ее восточная часть Красноярск — Чита — с горной страной. При этом участок этой линии Красноярск — Иркутск проходит по структурам юга Сибирской платформы, которые в процессе развития испытывали существенные колебательные движения. С неоген-четвертичного времени основная из этих структур — Прибайкальский предгорный прогиб — имеет тенденцию к общему поднятию [5]. Далее нивелирная трасса идет по структурам Байкальского свода. Не останавливаясь на подробном изложении результатов сопоставления геодезических и геолого-геоморфологических данных [1], необходимо отметить, что современный интенсивный подъем района Иркутск — Култук — Улан-Удэ следует признать вполне закономерным явлением и рассматривать как следствие продолжающегося развития Байкальского свода. Длительное унаследованное развитие региональных структурных элементов обусловило их выраженность в современном рельефе и в современных вертикальных движениях (см. рис. 2, а). Таким образом, основные черты графика изменения превышений по профилю Кинель — Красноярск — Чита с большим основанием могут быть объяснены медленными тектоническими движениями земной коры. Подобный анализ данных повторного нивелирования всех остальных линий с более детальными геологическими, геоморфологическими и другими материалами обнаружил, что не только региональный характер изменения графиков кривой (ΔH), но и отдельные его детали согласуются с геологическими структурами.

2. Рассмотренные линии нивелирования, образующие на территории Байкальского сводового поднятия ряд замкнутых полигонов, послужили основой для изучения площадного распределения скоростей современных вертикальных движений и составления «Карты скоростей современных вертикальных движений земной коры южного Прибайкалья и Забайкалья» в масштабе 1:1 000 000 (рис. 3). В связи с тем, что исследуемый регион удален как от уровневых пунктов, так и от узловых пунктов нивелирования с известными абсолютными скоростями вертикальных движений на несколько тысяч километров, сочли необходимым выбор некоторого высотного репера, от которого можно вести вычисления относительных скоростей вертикальных движений для различных частей изучаемого региона. За подобный исходный (нулевой) репер была принята марка Мр б/н, заложенная в здание депо ст. Красноярск. Предпочтение именно этому реперу отдано потому, что, во-первых, он является пунктом линии высокоточного нивелирования; во-вторых, весьма важно, что Красноярск находится в современной зоне, спокойной в тектоническом, в том числе и сейсмическом, отношении. И наконец, положение Красноярска весьма удачно, поскольку он расположен в центре зоны сопряжения трех различных регионов: Западно-Сибирской плиты, Алтае-Саянской горной страны и Сибирской платформы.

При составлении карты была использована методика, разработанная и применяемая при составлении и построении «Сводной карты современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы» [6].

Оценка точности скоростей вертикальных движений выполнена по формуле

$$m_v^2 = \frac{\bar{\eta}^2 L}{\Delta t^2},$$

где $\bar{\eta}^2 = \eta_1^2 + \eta_2^2$, η_1 и η_2 — средние квадратические случайные ошибки первой и повторной нивелировок, Δt — интервал времени между нивелировками.

Для территории Прибайкалья и Забайкалья, покрытой сетью нивелирных полигонов, оценка скоростей выполнена еще и по невязкам скоростей этих полигонов (см. рис. 1).

Как видно из табл. 2, невязки в определении скоростей на таких полигонах, как II, III, IV и V, в несколько раз меньше допустимых. Полигон I с периметром в 1185 км имеет невязку скоростей, несколько превышающую допустимую, что можно объяснить отмеченным выше невысоким качеством нивелирования участка Утаты — Жемчуг линии Кяхта — Жемчуг.

Уравнивание сети выполнено способом условных измерений с учетом весов скоростей движений по линиям между узловыми и исходными пунктами; за последние принимались реперы линии 1-го класса Красноярск — Иркутск — Чита с известными скоростями, вычисленными относительно Красноярска. Веса скоростей движений вычислялись по формуле

$$P = \frac{100}{(\eta_1^2 + \eta_2^2) L} \left(\frac{\Delta t}{30} \right)^2,$$

где η_1 и η_2 — средние квадратические ошибки первого и второго нивелирования; L — длина линии, км; Δt — интервал времени между нивелировками.

В результате уравнивания получены: 1 — средняя квадратическая ошибка единицы веса, $\mu = \pm 0,4$; 2 — средняя квадратическая ошибка скорости движений пункта, удаленного на 1 км от исходного, $v = \pm 0,07$ мм/год; 3 — вероятнейшие значения скоростей движений в 8 узловых точках геодезической основы карты, которые затем были использованы для определения скорости движений для остальных 436 знаков повторного нивелирования. При этом для каждой линии вычислялась невязка: $f = \sum v_{\text{отн}} - (v_2 - v_1)$, где v_1 и v_2 — скорости в узловых точках линии (начальной и конечной соответственно), полученные из уравнивания; $\sum v_{\text{отн}}$ — сумма неуровненных скоростей движений по линии. Полученную невязку распределили пропорционально весам. После этого «уровненные» значения относительных скоростей движений всех 436 пунктов нивелирной сети были нанесены на карту масштаба 1:1 000 000 (см. рис. 3).

Таблица 2

Значения невязок относительных скоростей при замыкании полигонов

Полигон	Невязка скоростей (f), мм/год		Периметр, P , км	Разрыв линий повторного нивелирования, %
	измеренная	допустимая		
I	+6,7	$\pm 5,8$	1185	0,8
II	-1,2	$\pm 4,3$	780	1,3
III	-4,0	$\pm 6,7$	1605	1,0
IV	+2,4	$\pm 6,1$	1372	0,1
V	+0,6	$\pm 3,8$	584	0,0

В целях интерполяции значений скоростей внутри этой сети применен комплекс геолого-геофизических данных. Используемая методика такой интерполяции подробно изложена в [3].

На представленной карте изображены структурно-тектоническая основа, морфоструктурные элементы, геодезическая и геофизическая изучен-

ность, направленность и интенсивность современных вертикальных движений. Основные изолинии скоростей проведены через 2 мм/год.

Полученное значение «километровых» ошибок скорости СВДЗК можно уверенно использовать для оценки точности определения скоростей этих движений реперов, удаленных на различные расстояния от исходного пункта. На основе этих значений составлена в изолиниях схема точности определения величин скоростей движений, которая представлена на карте-врезке. Ошибки определения скоростей движений возрастают по мере удаления от «исходного» пункта (Красноярска): от $\pm 0,5$ мм/год вблизи Красноярска до $\pm 2,8$ мм/год в восточной части исследуемой территории. Такую точность определения скорости можно считать допустимой, так как скорости по всей величине превышают возможные ошибки их определения не менее чем в 3—4 раза.

Отмечаются определенные закономерности в распределении современных движений. Наблюдающаяся пространственная дифференциация этих движений прежде всего связана с крупными морфоструктурными областями: Сибирской платформой, Байкальским сводовым поднятием и Забайкальской складчатой областью. При этом собственно Байкальская рифтовая зона и ее ближайшее горное обрамление, относящееся к сводовой части Байкальского поднятия, характеризуется наиболее высоким контрастом скоростей вертикальных движений. Значения последних здесь меняются от $+10$ до $+20$ мм/год. Максимальные скорости относятся к зонам новейшего и современного (голоценового) вулканизма в районах Амалатского хребта Витимского плоскогорья. Рифтовые впадины имеют наименьшие значения скорости. Для Западно-Забайкальской зоны мезокайнозойской активизации по мере удаления ее от центральных частей Байкальского свода значения скорости вертикальных движений плавно уменьшаются с северо-запада на юго-восток (от $+12$ до $+3$ мм/год). Таким образом, на карте скоростей современных вертикальных движений отчетливо видно, что собственно Байкальская рифтовая зона приурочена к северо-западной части Байкальского свода, границы которого достаточно хорошо совпадают с границами пониженных сейсмических скоростей поверхности Мохо.

Оценивая «Карту скоростей современных вертикальных движений южного Прибайкалья и Забайкалья», необходимо подчеркнуть ее схематичность. При вычислении скоростей движений принималось допущение, что они изменялись одинаково по величине ежегодно и в одном направлении; определения скорости выполнены в основном по данным только однократного повторного нивелирования довольно редкой сети нивелирования; проведение изолиний скоростей вертикальных движений осуществлялось главным образом методом линейной интерполяции, в основе которого лежит предположение о плавном изменении этого параметра от одного репера к другому.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байкальский геодинамический полигон. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1970.
2. Варламов И. П. Карта новейшей тектоники Западно-Сибирской равнины масштаба 1 : 2 500 000. Объяснительная записка к ней. Изд. Картографо-геодезическое предприятие ГУЦР, 1969.
3. Колмогорова П. П., Каратаев Г. И. Прогнозирование скоростей современных вертикальных движений земной коры с помощью корреляционной модели по статическим геолого-геофизическим данным.— В кн.: Методические вопросы исследований современных движений земной коры. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975.
4. Справочник геодезиста. Т. II. М., «Недра», 1975.

5. Структура и история развития Предбайкальского предгорного прогиба. М., «Наука», 1976.
6. Энтин И. И., Матцкова В. А., Мещерский И. Н. Геодезическое обоснование карты современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы для территории европейской части СССР.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.

Л. М. Кнуренко

КАРТА СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ КУЗБАССА

Кузбасс является крупным горнодобывающим районом с активным проявлением внезапных выбросов угля и газа, горных ударов и высокой сейсмичностью: на его территории отмечено несколько 6, 7-балльных землетрясений. Все это определило необходимость изучения современных движений земной поверхности в Кузбассе. В данной работе предлагаются результаты первого исследования по составлению карты распределения скоростей современных движений земной коры Кузбасса в изолиниях.

Для изучения современных вертикальных движений на территорию Кузбасса и прилегающих к нему районов было собрано и обработано 2817,3 км линий повторного нивелирования, включающих 285 геодезических знаков.

На каждую изученную линию составлены характеристики, содержащие описание инструментов, методику исполнения первого и повторного нивелирований, значения случайной и систематической ошибок, полученные невязки и ряд других данных.

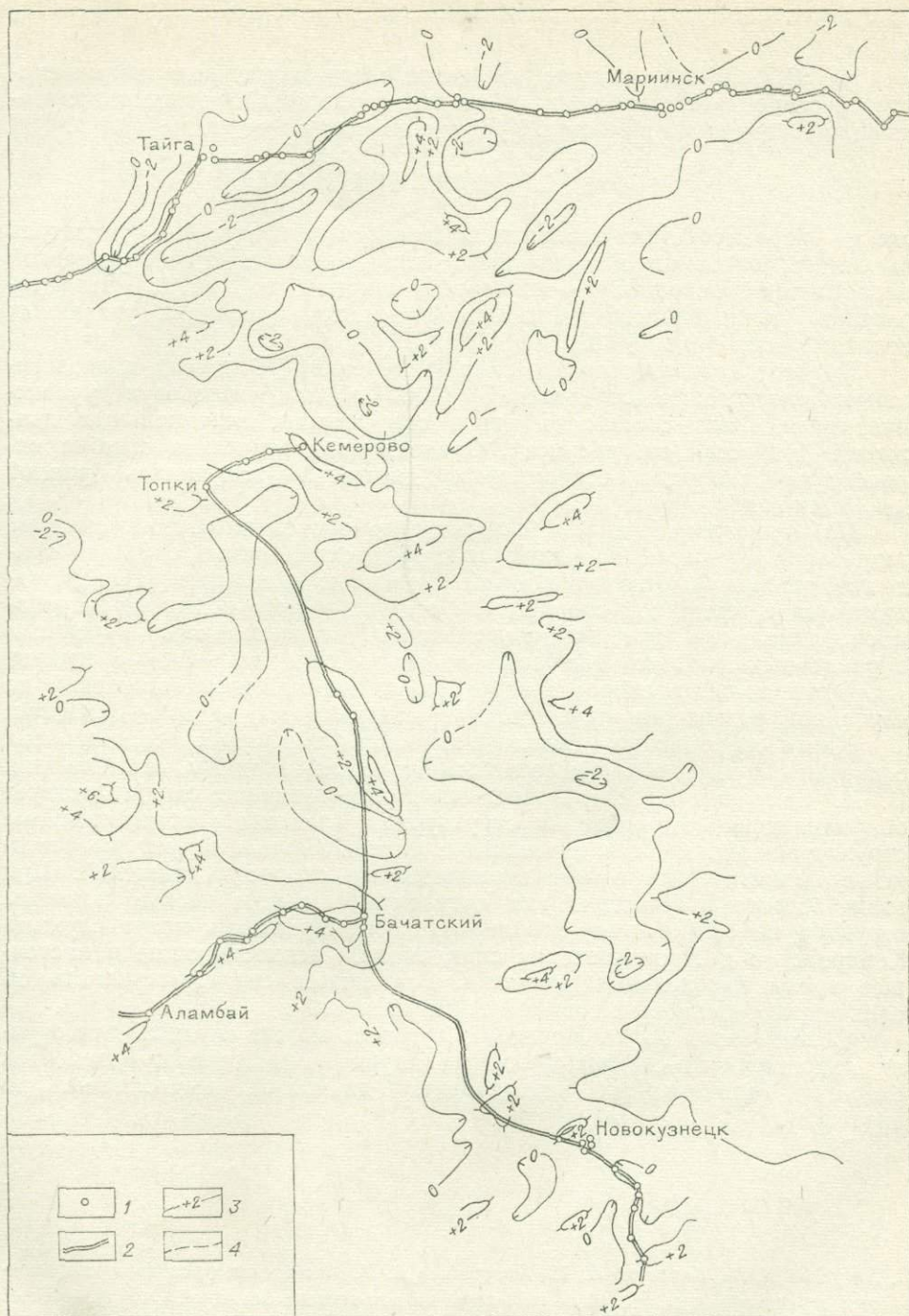
Анализ качества и методов исполнения работ свидетельствует о возможности использования геодезического материала для изучения современных движений земной поверхности.

Обработка материалов выполнена по методике ЦНИИГАиК [7]. В качестве исходного пункта взят г. Новосибирск (марка 1720) по следующим соображениям. По данным о новейшей тектонике [3] район г. Новосибирска относится к области слабых поднятий. На слабую тектоническую активность данного района указывают геоморфологические исследования Н. И. Маккавеева и Р. С. Чалова в долине р. Оби [4, 5]. Более того, район Новосибирска расположен, согласно геоморфологическим исследованиям Н. И. Маккавеева и Р. С. Чалова [4, 5], между участками эрозионных процессов в деятельности р. Оби и преобладающей аккумуляции.

Характеристика качества нивелирования и сведения о скоростях современных движений по каждой линии повторного нивелирования приведены в [1]. Контроль вычисленных значений скоростей выполнен по невязкам полигонов повторного нивелирования. Подсчет невязок проводился по часовой стрелке, скорость движений в месте разрыва принималась равной нулю [7].

Полигон	Невязка, мм/год	Периметр, км	Разрыв линий, %
1	—0,8	954,8	0
2	+3,3	2092,2	5

По геодезическим материалам территория Кузбасса охарактеризована 76 пунктами, имеющими скорости современных движений. Они распределены неравномерно: 48 пунктов расположено на линии, пересекающей Кузбасс субширотно на севере, и 28 пунктов — в центральной части бассейна. Сгущение сети исходных точек в целях построения карты современных движений на территорию Кузбасса было проведе-



Современные движения земной коры Кузбасса.

1 — геодезические знаки; 2 — линии повторного нивелирования; 3 — изолинии скоростей; 4 — предполагаемые изолинии скорости.

но по результатам полевых и камеральных геоморфологических исследований, выполненных по методике, предложенной Ю. А. Мещеряковым и В. А. Филькиным [6].

Геоморфологические признаки, имеющие количественное выражение, определены в 1300 точках, в том числе и в 68 пунктах, имеющих

скорости современных движений по материалам повторного нивелирования.

На ЭВМ М-220 получено уравнение связи между величинами скоростей современных движений и геолого-геоморфологическими признаками, выраженными в баллах. Уравнение связи имеет вид

$$v = 0,59g + 0,70h + 0,84l + 0,17\bar{m} + 0,57,$$

где g — характеристика строения пойменного аллювия; h — показатель высотного положения и морфологических особенностей пойм и первой надпойменной террасы; l — показатель ширины поймы; $\bar{m}$ — характеристика заболоченности поймы. Коэффициент корреляции указанных величин равен $+0,89 \pm 0,02$.

По результатам геодезических измерений (76 точек) и геолого-геоморфологических исследований (1300 точек), используя уравнение связи, была составлена карта современных вертикальных движений Кузбасса (см. рисунок). Средняя квадратическая ошибка определения скорости современных движений получилась равной $\pm 1,18$ мм/год.

Из прилагаемой карты следует, что современные движения на территории Кузбасса проявляются дифференцированно с общей тенденцией к преобладанию поднятий. При этом отдельные районы поднимаются с различной скоростью. На фоне общего поднятия встречаются локальные участки современного относительного опускания в различных районах Кузбасса со скоростями до $-2 \div -3$ мм/год.

Относительные скорости современных вертикальных движений на изучаемой территории изменяются в пределах от -4 до $+6$ мм/год.

Карта современных движений земной коры Кузбасса сопоставлена с картой структур осадочного чехла Кузнецкой впадины, составленной В. И. Семеркиным [8]. Проведенное сопоставление свидетельствует об унаследованном развитии структурных элементов: положительные структуры поднимаются интенсивнее, отрицательные структуры отстают в поднятии или имеют отрицательные скорости движений. При этом встречены участки, где современное тектоническое развитие структур не согласуется с более ранним. Примером могут служить Кемеровская и Прокопьевская синклинали, испытывающие в настоящее время интенсивные поднятия. Это может свидетельствовать об отличии и особенностях современной тектоники.

Составленная карта движений Кузбасса может служить для оценки напряженного состояния горных пород по величинам градиентов скоростей современных вертикальных движений, вычисляемых по карте [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Батугина И. М., Кнуренко Л. М., Лаврентьев А. И. Материалы к познанию современных вертикальных движений земной коры на юго-востоке Западной Сибири. — «Геол. и геофиз.», 1974, № 12.
2. Гзовский М. В. Геофизическая интерпретация данных о новейших и современных глубинных тектонических движениях. — В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 1. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1963.
3. Карта новейшей тектоники Западно-Сибирской равнины, масштаб 1 : 2 500 000. Новосибирск, 1967.
4. Маккавеев Н. И., Чалов Р. С. О развитии рельефа речных террас и признаки глубинной эрозии на примере Верхней Оби. — «Изв. АН СССР. Сер. геогр.», 1964, № 4.
5. Маккавеев Н. И., Чалов Р. С. О морфологических признаках современной аккумуляции в речной долине. — «Изв. АН СССР. Сер. геогр.», 1963, № 3.

6. Мещеряков Ю. А., Филькин В. А. Оценка геоморфологических признаков в баллах как метод количественной характеристики современных тектонических движений.— *Изв. АН СССР. Сер. геогр.*, 1965, № 1.
7. Современные вертикальные движения земной коры на территории западной половины европейской части СССР.— *Труды ЦНИИГАиК*, 1958, вып. 123.
8. Сурков В. С., Семеркин В. И. Тектоническое строение межгорных впадин.— В кн.: Геологические результаты геофизических исследований в Сибири и на Дальнем Востоке. Новосибирск, «Наука», 1967.

В. К. Захаров, В. П. Семакин, Г. Г. Якушко

ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЮГО-ЗАПАДЕ САХАЛИНА И МОНЕРОНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1971 г.

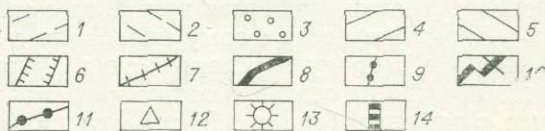
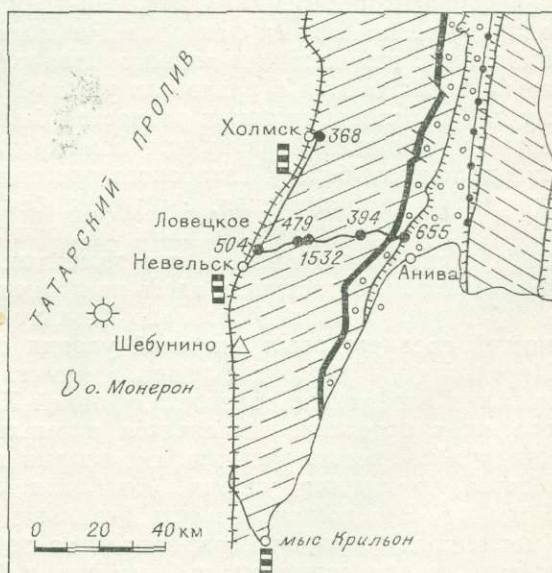
5 сентября 1971 г. вблизи о. Монерон (юго-западное побережье Сахалина) произошло самое сильное ($M=7,2$) из наблюдавшихся когда-либо ранее на Сахалине землетрясений. Оно сопровождалось значительным поднятием морского дна, которое вызвало цунами, достигавшее у берегов Сахалина высоты около 2 м.

Ближайшими к эпицентру землетрясения геодезическими сетями, в которых выполнялись повторные измерения, были линии высокоточного нивелирования, расположенные в западной части Сахалинского геодинамического полигона [2], и локальная сеть триангуляции 4-го класса в районе пос. Шебунино, на юго-западе о. Сахалин (рис. 1). Кроме них на юго-западном побережье Сахалина имеются 3 мареографические станции, ведущие непрерывную регистрацию уровня моря в портах Холмск и Невельск, а также на мысе Крильон, удаленные от эпицентра соответственно на 80, 50 и 85 км.

Одна из нивелирных линий проходит в северо-восточном направлении вдоль побережья Татарского пролива, соединяя мареографические станции в Невельске и Холмске. Другая, примыкая к первой на репере 504 (пос. Ловецкое), пересекает остров в восточном направлении. В наших исследованиях мы ограничимся участком линии до репера 394 длиной в 37 км, измеренным повторно после землетрясения.

Рис. 1. Расположение геодезических сетей и мареографических станций.

1 — Западно-Сахалинский антиклинарий; 2 — Восточно-Сахалинский синклинарий; 3 — Центрально-Сахалинский антиклинарий; 4 — Западно-Сахалинское новейшее поднятие; 5 — Суэнайска-Корсаковское новейшее поднятие; 6 — границы новейших впадин и прогибов; 7 — Западно-Сахалинский разлом; 8 — Центрально-Сахалинский разлом; 9 — предполагаемый разлом, проходящий по зоне высоких градиентов силы тяжести; 10 — поперечные разломы; 11 — линия и реперы повторного нивелирования; 12 — сеть триангуляции; 13 — эпицентр главного толчка Монеронского землетрясения; 14 — мареограф.



Реперы первой линии, как и мареографические станции Невельск и Холмск, располагаются в зоне Западно-Сахалинского разлома, отделяющего Западно-Сахалинский антиклинорий от структур Татарского пролива [1]. Антиклинорий в большей своей части совпадает в плане с крупным новейшим поднятием, имеющим то же название. На востоке поднятие граничит с Сусунайской впадиной, а западная граница его проводится по берегу Татарского пролива (см. рис. 1). Вторая нивелирная линия пересекает вкрест простирания Западно-Сахалинское поднятие, в пределах которого выделяется ряд новейших поднятий и прогибов более высокого порядка. Конечный репер линии (реп. 394) располагается на восточном крыле поднятия. Пункт уровненных наблюдений на мысе Крильон находится в осевой зоне Западно-Сахалинского поднятия, а плановая геодезическая сеть пос. Шебунино — на его западном крыле.

Таким образом, все наблюдения были выполнены в районах, которые непосредственно не связаны с сейсмоструктурой Монеронского землетрясения. Это, конечно, накладывает определенные ограничения на наши выводы. Несомненно, что подобные наблюдения на о. Монерон могли бы дать более интересные результаты. Но, к сожалению, геодезические измерения здесь не проводились, а систематические наблюдения за уровнем моря были прекращены в 1959 г.

Непрерывную и более полную информацию об изменении высот суши дают систематические наблюдения за уровнем моря. На мареографических станциях в Невельске и Холмске они ведутся уже более 25 лет. Нами проанализированы результаты наблюдений на этих станциях за 1955—1973 гг. Качество уровненных наблюдений на мысе Крильон низкое, поэтому здесь были отобраны значения уровня лишь за последние несколько лет.

Наблюдённые значения уровня приводились к нулям постов с точностью до миллиметров и исправлялись за влияние гидрометеорологических факторов по методике С. Ямагути [4]. Следует заметить, что данная методика позволила снизить флюктуации средних годовых значений уровня примерно на 20%. По-прежнему оставалось значительным влияние региональных факторов. Не были исключены колебания уровня, вызванные изменениями водного баланса. Однако как те, так и другие легко исключаются в разностях уровней разноименных станций. Поэтому для образования таких разностей были привлечены результаты уровненных наблюдений на пункте Иннокентьевка, расположенном на противоположном берегу Татарского пролива, в 260 км к северо-западу от эпицентра землетрясения. Учитывая большую удаленность пункта от эпицентра и совершенно иные тектонические условия, в которых он находится, можно считать, что заметных вертикальных движений, связанных с землетрясением, здесь не происходило.

На рис. 2 последовательно (сверху вниз) показаны графики разностей среднегодовых значений уровня сахалинских станций Холмска, Невельска и Крильона с уровнем пункта Иннокентьевка, а на нижнем графике изображена разность уровней Холмска и Невельска. На всех графиках отчетливо выделяется аномальное изменение уровня, предшествующее землетрясению. На первых двух оно проявляется на фоне общего понижения уровня (поднятия суши) интенсивностью около 2 мм/год. Это понижение есть результат суммарного эффекта вековых (медленных) движений юго-западного побережья Сахалина, поднимающегося со скоростью около 1 мм/год, и берега в районе пункта Иннокентьевка, опускающегося примерно с той же скоростью.

Аномалия носит форму колебания с периодом около 6 лет, направленного в сторону опускания суши. Аномальное возбуждение проявилось прежде на севере, а затем мигрировало к югу. В Холмске наибольшее опускание (около 2,5 см) отмечалось в 1966 г., в Невельске оно

Рис. 2. Разности среднегодовых уровней.

1 — Холмск — Иннокентьевка ($l_X \sim 80$ км, $l_I \sim 260$ км); 2 — Невельск — Иннокентьевка ($l_N \sim 50$ км; $l_I \sim 260$ км); 3 — Крильон — Иннокентьевка ($l_K \sim 85$ км; $l_I \sim 260$ км); 4 — Холмск — Невельск ($l_X \sim 80$ км, $l_N \sim 50$ км).

уже достигает 3 см и приходится на 1968 г. Смещение суши на Крильоне было, видимо, более значительным, и опускание достигло максимума за 2 года до землетрясения. В последующие годы происходило движение суши в обратном направлении, которое к моменту возникновения землетрясения полностью компенсировало аномальное опускание, наблюдавшееся в Холмске и Невельске.

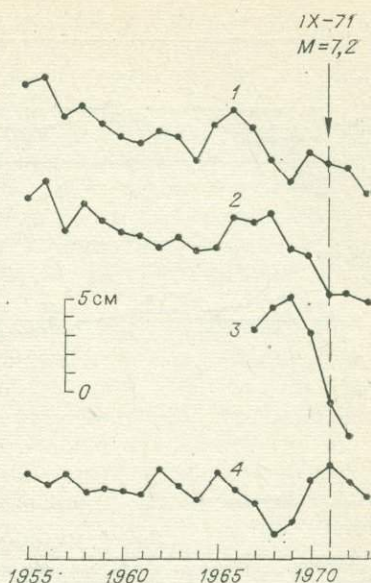
Различие в движении побережья в Холмске и Невельске хорошо устанавливается на нижнем графике (см. рис. 2). Особенно резко оно стало проявляться с 1966 г., когда наклон побережья в сторону Невельска принял направленный характер. В 1968 г. наклон достиг максимума: побережье в Невельске опустилось по отношению к Холмску примерно на 3 см. Затем высоты пунктов начали выравниваться и в 1970 г., т. е. за год до землетрясения, достигли одинакового уровня, однако процесс относительного поднятия суши в Невельске еще продолжался и прекратился лишь после землетрясения.

Резких смещений суши в момент землетрясения ни по средним месячным, ни по средним суточным значениям уровня выявить не удалось. Видимо, на юго-западе Сахалина они были незначительны.

Первые измерения указанных выше нивелирных линий были выполнены Союзмаркштрестом в 1959 г. Точность их соответствовала нивелированию 2-го класса. Последующие измерения проводились Сахалинским комплексным научно-исследовательским институтом по программе нивелирования 1-го класса. В 1968 г. была выполнена нивелировка от г. Невельска до г. Анивы, причем на участке Невельск — репер 504 (Ловецкое) она была проведена впервые для связи нивелирной сети с морским уровнем пунктом в г. Невельске. Участок побережья от пос. Ловецкое до г. Холмска повторно измерялся в 1970 г (см. рис. 1).

В 1971 г., за два месяца до землетрясения, была начата третья нивелировка линий, идущей к востоку от пос. Ловецкое. К моменту землетрясения был пройден ход длиной 19 км между фундаментальными реперами 504 и 1532. Первый из них расположен на западном побережье острова, в 6 км к северо-востоку от пункта наблюдений за уровнем моря в г. Невельске. Второй, заложенный в 1969 г., нивелировался впервые. Располагается он в приосевой части Западно-Сахалинского новейшего поднятия в 600 м к востоку от репера 479, сохранившегося с 1959 г. (см. рис. 4).

После землетрясения измерения между этими реперами были повторены. Тем самым представилась возможность сравнить высоты реперов, расположенных на западном крыле Западно-Сахалинского поднятия, полученные непосредственно до и после землетрясения. В следующем, 1972 г., измерения были продолжены далее к востоку. Нивелирование вдоль западного побережья острова после землетрясения не выполнялось, за исключением измерений между Невельским уровнем пунктом и фундаментальным репером 504, которые были проведены в ноябре 1971 г.



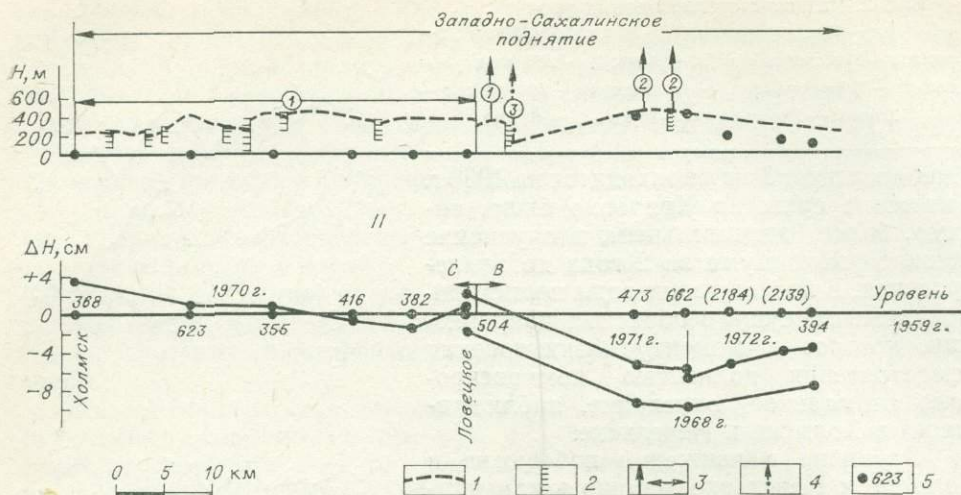


Рис. 3. Изменения высот земной поверхности.

1 — новейшие структуры вдоль профиля повторного нивелирования; структуры 2-го порядка (цифры в кружках): 1 — Южно-Прибрежное поднятие; 2 — Южно-Камышовое поднятие; 3 — Ольховский прогиб. II — изменение отметок реперов относительно уровня 1959 г.: 1 — современное положение неоген-четвертичной полигенетической поверхности выравнивания; 2 — новейшие и омоложенные дочетвертичные разломы; 3 — новейшие поднятия; 4 — новейшие прогибы; 5 — репер повторного нивелирования и его номер.

Таким образом, до землетрясения вся рассматриваемая нивелирная сеть была измерена дважды, а на участке между реперами 504 и 1532 — трижды. После землетрясения измерения выполнялись на участках Невельск — репер 504 и репер 504 — репер 394.

Вертикальные смещения реперов относительно положения, занимаемого ими при первом нивелировании в 1959 г., изображены на нижнем графике рис. 3. В качестве опорного пункта, к которому были отнесены высотные измерения, служил фундаментальный репер 504, собственные движения которого определялись по данным непрерывных наблюдений за уровнем моря в Невельске с погрешностью в ± 1 см. Что касается относительных положений реперов, определяемых по результатам нивелирования, то точность их уменьшается с удалением от исходного пункта, но даже в самом худшем случае средняя квадратическая ошибка смещения, полученная за счет ошибок нивелирования, не превосходит ± 1 см.

На графике показаны результаты 1971 г., полученные после землетрясения. Результаты 1972 г. стыкуются с ними на репере 662. При стыковке принимались во внимание средняя скорость движения репера 662 относительно опорного репера 504, полученная за последние годы, и собственное движение репера 504. Реперы, номера которых в скобках, были заложены после 1959 г. Их смещения отнесены к уровню 1959 г. путем интерполяции графика нивелирования 1968 г.

Наблюдаемые смещения реперов отражают суммарный эффект медленных (вековых) и быстрых (сейсмических движений земной поверхности [3]. Роль первых тем значительнее, чем больше период между нивелировками. Вторые наиболее активны в период подготовки и во время землетрясения.

Высоты реперов, измеренные при втором нивелировании (1968 и 1970 гг.), оказались заниженными в результате воздействия аномальных движений, которые, как показали уровенные наблюдения, вызвали опускание земной поверхности. Этим, по-видимому, объясняется небольшое понижение реперов 416 и 382, расположенных на западном побережье о. Сахалин, где в целом наблюдается «вековое» поднятие

берега. Все реперы, расположенные вдоль побережья между Холмском и Невельском, в 1970 г. существенно не изменили своего положения относительно 1959 г. Это может быть объяснено, во-первых, слабой интенсивностью вековых движений на побережье, во-вторых, малым воздействием аномальных движений, которые к 1970 г. уже значительно ослабли, и, в-третьих, различной направленностью тех и других, приведшей к некоторой компенсации этих двух видов движений. Отмечается общий наклон земной поверхности к югу. По-видимому, он вызван постепенной миграцией аномального опускания земной поверхности с севера на юг, которая устанавливается на графиках изменения уровня моря.

Аномальное опускание земной поверхности, наблюдавшееся на западном побережье острова, проявилось также и в его глубине, о чем свидетельствует поведение реперов вдоль второй нивелирной линии (см. рис. 3, график II). Действие аномальных движений привело здесь к значительным смещениям реперов. Наибольшее опускание (до 10 см в 1968 г.) испытали реперы в приосевой части Южно-Камышового поднятия (реп. 479 и 662). Репер 394, расположенный на восточном крыле этого поднятия, опустился к 1968 г. на 8 см. Опускание западного побережья, где вековые движения имеют положительную направленность, связано только с проявлением аномальных движений перед землетрясением. Репер 504, расположенный на побережье, опустился к 1968 г. примерно на 2 см.

Кривая, изображающая положение реперов в 1968 г. на участке репер 504 — репер 394, по-видимому, соответствует наибольшему опусканию земной поверхности перед землетрясением. К такому выводу приводит нас наблюдавшийся в этом же году самый высокий уровень моря у г. Невельска. В последующие 3 года, предшествующие землетрясению, западное крыло Западно-Сахалинского поднятия испытало равномерное воздымание на высоту примерно 4 см. После землетрясения положение его существенно не изменилось. Измерения, выполненные через год после землетрясения на восточном крыле поднятия (реп. 662 — реп. 394), показали, что и здесь произошло воздымание реперов на ту же высоту (около 4 см) по отношению к положению, занимаемому ими в 1968 г.

О характере движений, проявившихся в момент землетрясения, можно судить по данным нивелировок, выполненных непосредственно до и после него. Как уже указывалось, такие наблюдения были выполнены на западном крыле Западно-Сахалинского новейшего поднятия между фундаментальными реперами 504 и 1532 (рис. 4). Резуль-

Таблица 1

Тип, № репера	Длина секций, км	Осредненные даты наблюдений		Интервал времени между нивелировками, мес	Разность превышений, м	Возможные ошибки разностей, мм
		до землетрясения	после землетрясения			
Фнд, 504	3,0	20 июля	22 сентября	2,0	+0,4	±1,1
Ст, 1	3,1	8 »	18 »	2,3	-0,8	±1,1
Ст, 2	1,8	11 »	26 »	2,5	+1,6	±0,9
Гр, 83	4,3	8 августа	8 октября	2,0	-5,1	±1,3
Гр, 458	1,7	18 »	31 »	2,4	+1,0	±0,8
Гр, 76	4,0	22 »	25 »	2,0	-0,8	±1,3
Гр, 479	0,7	22 »	16 »	0,8	-0,9	±0,5
Фнд, 1532						
18,6					-4,6	

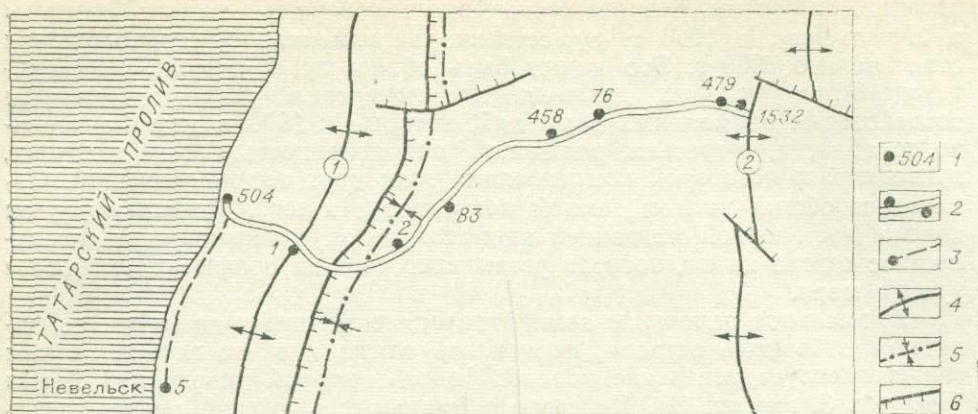


Рис. 4. Схема нивелирования непосредственно до и после землетрясения.

1 — репер и его номер; 2 — линия повторного нивелирования до и после землетрясения; 3 — линия нивелирования после землетрясения; 4 — оси новейших поднятий второго порядка (цифры в кружках): 1 — Южно-Прибрежное, 2 — Южно-Камышовое; 5 — Ольховский новейший прогиб; 6 — предполагаемые новейшие и омоложенные разломы.

таты их приведены в табл. 1. Сроки первого и второго нивелирования отличались примерно на 2 месяца. Погрешность измерения высот при первом нивелировании составила $\pm 0,5$ мм, а при втором $\pm 0,4$ мм на 1 км нивелирного хода.

Полученные расхождения в превышениях между смежными реперами малы и сравнимы с ошибками, с которыми они измерены. Только единственная разность превышений между реперами 83 и 458 изменилась на величину 5 мм, которая почти в 4 раза превысила ее возможную ошибку. Оба репера размещены на западном крыле Южно-Камышового поднятия, причем репер 458 располагается ближе к его осевой части.

Сравнение результатов нивелировки 1968 г. на участке между г. Невельском и фундаментальным репером 504 (Ловецкое) с замерами, выполненными после землетрясения, показало, что взаимное положение этих пунктов практически не изменилось.

На основании изложенного следует, что вертикальные смещения в момент землетрясения либо не проявились в районе наблюдений, либо произошли, но незначительные.

Кроме описанных выше, периодические измерения велись на локальной нивелирной сети в г. Холмске, где с 1970 г. наблюдалось поведение реперов, расположенных на различных террасовых уровнях. Сеть включает 6 реперов, попарно размещенных на 3 террасах. Измерения проводились в сентябре 1970 г., в августе и октябре 1971 г. и июле 1973 г., т. е. было выполнено две нивелировки до землетрясения и две после него. Оказалось, что перед землетрясением не было заметных смещений реперов, а после него на верхних террасовых уровнях они стали опус-

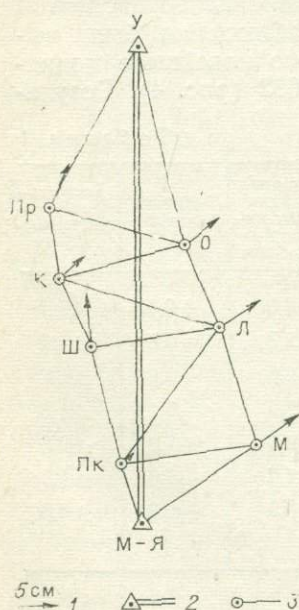


Рис. 5. Расположение пунктов повторной триангуляции в районе пос. Шебунино.

1 — масштаб горизонтальных смещений, 2 — исходные пункты триангуляции 3-го класса, 3 — определяемые пункты 4-го класса.

Таблица 2

каться со средней скоростью около 1 мм/год по отношению к реперам первой морской террасы.

Возможные горизонтальные смещения земной поверхности определялись на основании повторных измерений углов локальной сети триангуляции 4-го класса, созданной вблизи пос. Шебунино в 1959 г. Сеть имеет 7 пунктов, опирающихся на 2 пункта триангуляции 3-го (рис. 5). Повторные измерения проводились в октябре 1971 г. Ошибка измерения угла, вычисленная по результатам уравнивания, составила $\pm 1''{,}8$.

Сравнение координат определяемых пунктов, полученных по результатам измерений 1959 и 1971 гг. позволяет установить изменение их положения относительно исходных пунктов 3-го класса, условно принятых за неподвижные. Величины смещений пунктов и их азимуты, а также ошибки определения этих смещений приведены в табл. 2. На 6 пунктах смещения в 2—2,5 раза превосходят их ошибки. Азимуты смещений 6 пунктов имеют северо-восточное направление и только один пункт Ш — северо-северо-западное. Он же имеет наибольшее смещение, равное 7 см (см. рис. 5).

Есть основание предполагать, что измеренные относительные смещения произошли в результате Монеронского землетрясения, вызвавшего сдвиг мелких блоков земной коры в районе Шебунино, и что пункт Ш располагается на одном из таких обособленных блоков. К сожалению, не представляется возможным сравнить полученные горизонтальные смещения с вертикальными из-за отсутствия здесь высотной геодезической основы достаточно высокой точности.

Итак, на основании геодезических измерений и наблюдений за уровнем моря, выполненных на юго-западе о. Сахалин в 50—85 км от эпицентра Монеронского землетрясения установлено следующее.

1. Повсеместно наблюдаемое аномальное опускание земной поверхности сменилось за 2—4 года до землетрясения на движение противоположного знака. 2. Величина поднятий к моменту землетрясения достигала 4 см и на многих участках компенсировала наблюдавшееся ранее опускание суши. 3. Заметных вертикальных смещений в момент землетрясения не обнаружено. 4. Было зарегистрировано горизонтальное перемещение до 7 см мелких приповерхностных блоков, удаленных от эпицентра на 40 км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексейчик С. Н., Гальцев-Безюк С. Д., Ковальчук В. С. Основные черты тектоники.— В кн.: Геология СССР. Т. XXXIII. Остров Сахалин. М., «Недра», 1970.
2. Захаров В. К., Сарычева Р. А., Семакин В. П., Якушко Г. Г. Исследования на Сахалинском геодинамическом полигоне.— В кн.: Современные движения земной коры. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
3. Мещеряков Ю. А. О движениях земной коры — предвестниках землетрясений.— В кн.: Верхняя мантия. Вып. 11. Земная кора сейсмоопасных зон. М., «Наука», 1973.
4. Yamaguti S. On the changes in the heights of mean sea-levels, before and after the great earthquakes.— "Bulletin of the Earthquake Research Institute", 1960, v. 38, p. 1.

О НАБЛЮДЕНИЯХ ЗА ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА САХАЛИНСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

В южной части Центрально-Сахалинского разлома, на приуроченных к нему поперечных разломах северо-западного простираения, проходящих по долинам рек, построены две локальные сети линейно-угловой триангуляции для наблюдения за горизонтальными движениями земной коры (рис. 1). Сеть «Южная» находится в зоне очагов коровых землетрясений, приуроченных к разлому по линии Анива — Холмск, построение «Ключи» — в зоне сейсмических очагов Синегорско-Быковской группы [4].

Сети расположены в районах периодического наблюдения за вертикальными движениями и построены с учетом смещений, установленных по геолого-геоморфологическим данным.

Сеть линейно-угловой триангуляции «Южная» состоит из 4 пунктов, образующих геодезический четырехугольник со сторонами 2,6—4,4 км. Сеть «Ключи» — почти правильный шестиугольник со сторонами от 1,3 до 2,4 км. Наибольшее превышение между пунктами в обоих построениях около 280 м. Все пункты, кроме 3-го сети «Ключи» и 1-го и 2-го сети «Южная», доступны для транспорта (рис. 2).

Центры, расположенные в долинах (1-й, 2-й в сети «Южная» и 1-й, 6-й в сети «Ключи»), прунтовые, трубчатой конструкции, выполненные из эмалированных труб длиной 1,8 м. Пункты, построенные на вершинах (3-й, 4-й в сети «Южная» и 3-й, 4-й в сети «Ключи»), скального типа, заложенные на глубину 1,6 м с заглублением в коренные породы на 0,6 м. Железобетонные монолиты, выходящие на поверхность, имеют площадки для принудительной центрировки приборов. В дальнейшем планируется развитие обоих геодезических построений на северо-запад по направлению простираения разломов.

Первые измерения в сетях выполнены в 1974 г. Работами руководили И. М. Конопальцев и В. К. Захаров. Горизонтальные углы измерялись видоизмененным способом круговых приемов И. М. Конопальцева [2], который позволяет получить равноточными все средние значения измеряемых углов. Для этого на каждом пункте во время наблюдений сразу заполнялась черновая сводка отдельных значений углов для систематического слежения за выполнением дифференцированных допусков на размах значений, который и определяет необходимое количество приемов для получения равноточных измерений.

Наблюдения с каждого пункта проводились в 2—3 видимости и были усложнены резкими перепадами температуры и влиянием боковой рефракции для направлений, проходящих около склонов гор. Визирование осуществлялось на марки, проектирующиеся на бе-



Рис. 1. Расположение локальных сетей линейно-угловой триангуляции.

1 — зоны очагов землетрясений с магнитудой от 3 до 5; 2 — эпицентры землетрясений с магнитудой 5 и их даты.

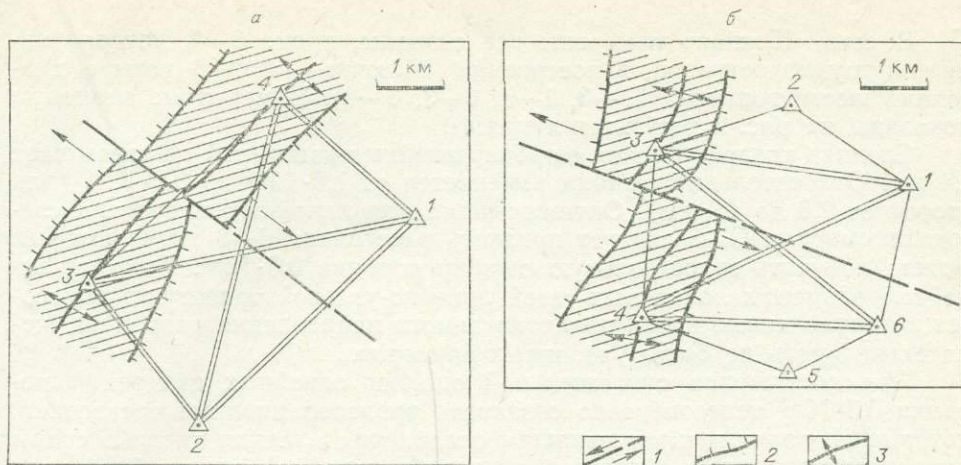


Рис. 2. Сети «Южная» (а) и «Ключи» (б).

1 — предполагаемый разлом и направление предполагаемого смещения; 2 — подножные уступа в рельефе; 3 — ось новейшего поднятия.

лый экран. Размеры марок подбирались в зависимости от расстояния. Центрирование выполнялось теодолитами. Элементы редукции определялись с точностью до 0,1 мм и после наблюдения.

В сети «Южная» измерения проведены теодолитом ОТ-02М по программе 1-го класса (средняя квадратическая ошибка $M_0 < 0'',27$). В сети «Ключи» на всех пунктах углы измерялись двумя аналогичными теодолитами по программе 2-го класса каждым ($M_0 > 0'',42$), что в среднем обеспечивает точность измерений не ниже 1-го класса.

Средние квадратические ошибки измеренных горизонтальных углов по невязкам треугольников составляют $0'',51$ для обеих сетей линейно-угловой триангуляции.

С целью редуцирования измеренных расстояний превышения пунктов определялись тригонометрическим нивелированием. В сети «Южная» выполнено двухстороннее тригонометрическое нивелирование, в построении «Ключи» — как одностороннее, так и двухстороннее. Зенитные расстояния измерялись 5—9 приемами теодолитом ОТ-02М с изменением места зенита. Высоты марок и теодолита измерялись с точностью до 1 мм. Для ослабления влияния вертикальной рефракции измерения проводились после полудня до начала спокойных изображений. В сети «Ключи» по результатам двухстороннего нивелирования была определена средняя поправка к коэффициенту рефракции, с учетом которой вычислялись превышения пунктов при одностороннем тригонометрическом нивелировании. Средние квадратические ошибки определения превышений составляют 3 см для сети «Южная» и 1,5 см для сети «Ключи».

Измерение линейных элементов выполнено светодальномером СГ-3 со штатива 10—12 приемами по 12—15 отсчетов в каждом. Все измерения проведены в 2 видимости в вечерний период спокойных изображений. Наблюдения располагались симметрично моментам изотермии, наступлению которой способствовали благоприятные метеорологические условия: температура воздуха, близкая к 0°C , низкая облачность, выпадающий дождь, умеренный ветер. Центрировка приемо-передатчика и отражателей осуществлялась с помощью оптического отвеса с точностью 0,1 мм, на пунктах скального типа применялась принудительная центрировка отражателей. Высоты приемо-передатчика и отражателей относительно центров знаков измерялись с точностью до 1 мм. Измерение метеорологических элементов производились до начала и после окончания приема.

В сети «Южная» измерены все стороны, кроме 3—4, которая является труднодоступной, в построении «Ключи» — только четыре диагонали шестиугольника (1—3, 1—4, 6—3, 6—4). Измеренные элементы показаны на рис. 2 двойными линиями.

Средняя квадратическая ошибка линейных измерений не превышает 4,4 мм. Относительная ошибка изменяется от $1,5 \cdot 10^{-6}$ до $0,8 \cdot 10^{-6}$ (для сторон от 2,6 до 4,9 км). Оптимальными для линейных измерений светодальномером СГ-3 следует признать расстояния 6—8 км, на которых можно получить относительную ошибку порядка $0,5 \cdot 10^{-6}$. Поэтому линейные элементы локальных сетей линейно-угловой триангуляции, особенно направленные вдоль предполагаемого направления движений, желательны иметь не более указанных размеров.

При достижении относительной ошибки линейных измерений порядка $0,5 \cdot 10^{-6}$ целесообразно создавать трилатерационные построения, которые позволят при надлежащем ослаблении влияния внешней среды определять взаимные смещения пунктов по крайней мере в 3—4 раза точнее триангуляционных методов (измерение углов в триангуляции с ошибкой менее $0'',4$ или $2 \cdot 10^{-6}$ в линейной мере связано с очень большими трудностями [1]).

Задачами дальнейшего повышения точности определения планового положения пунктов являются.

1. Создание эталонного базиса для систематического контроля постоянной поправки светодальномера. 2. Исследование ошибок регистрации фазы в светодальномере СГ-3 [4]. 3. Создание аппаратуры для дистанционной регистрации градиентов температуры в приземном воздушном слое. 4. Определение уклонений отвеса на пунктах. 5. Определение точных высот пунктов геометрическим или одновременным двухсторонним тригонометрическим нивелированием.

ЛИТЕРАТУРА

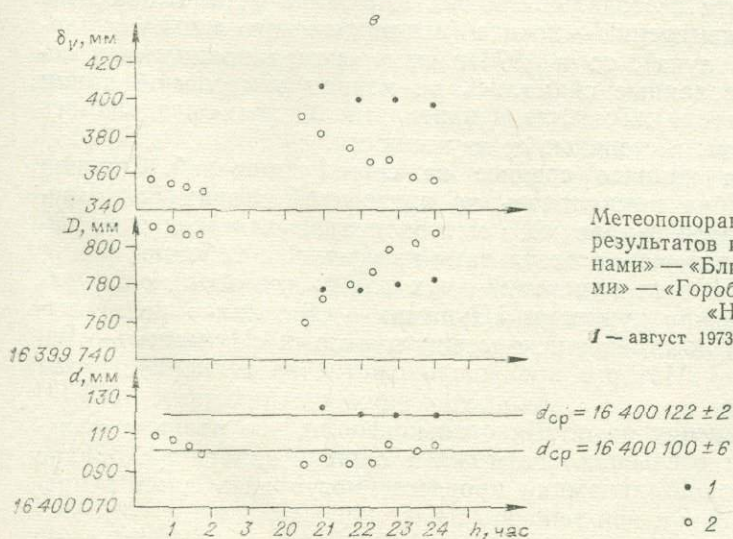
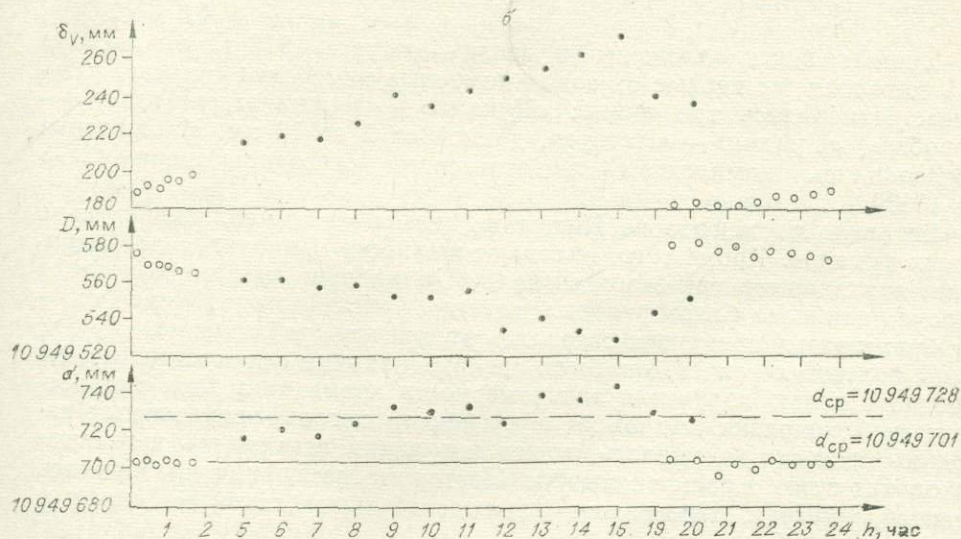
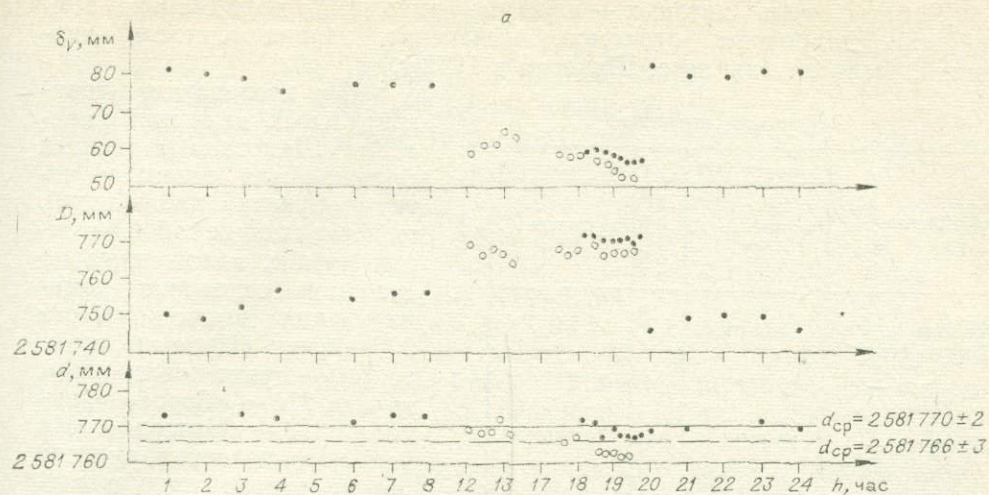
1. Изотов А. А. Технические проблемы изучения движений земной коры геодезическими методами. — В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
2. Конопальцев И. М. К вопросу о едином способе измерения углов. — «Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка», 1969, № 5.
3. Лазанов П. Е., Бланк Л. М., Давыденко Ю. А. Применение светодальномеров «Геодиметр-6» и «Кварц» для изучения горизонтальных движений земной коры. — В кн.: Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. Алма-Ата, 1973.
4. Соловьев С. Л., Оскорбин Л. С., Ферчев М. Д. Землетрясения на Сахалине. М., «Наука», 1967.

Н. Н. Одинов, Г. В. Сапрыкин

СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА О. ШИКОТАН В 1973—1974 гг.

Малая Курильская гряда — один из наиболее сейсмически активных районов. В связи с этим на о. Шикотан, разбитом сетью разломов на ряд блоков, был заложен геодинамический полигон.

Регулярные линейные измерения в пределах острова могут дать обширную информацию по связи горизонтальных деформаций с сейсмическим режимом в этом районе. Границы района, ответственного за подвижки на территории острова, могут быть определены лишь экспериментальным путем.



Метеопоправки и временной ход
 результатов измерений линий «Цу-
 нами» — «Ближняя» (а), «Цуна-
 ми» — «Горобец» (б), «Цунами» —
 «Натора» (в).

1 — август 1973 г.; 2 — сентябрь 1974 г.

• 1
 ○ 2

Работы, цель которых — изучение динамики деформаций, земной коры, выявление разломов, выяснение неравномерностей движений, были начаты на о. Шикотан в 1972 г.

Результаты измерений

Линия	Август 1973 г.		Сентябрь 1974 г.	
	Расстояние d, мм	Точность, $\pm \Delta$ мм	Расстояние d, мм	Точность, $\pm \Delta$ мм
«Цунами» — «Ближняя»	2 531 770	± 2	2 581 766	± 3
«Цунами» — «Горобец»	10 949 728	± 4	10 949 701	± 3
«Цунами» — «Натора»	16 400 122	± 2	16 400 100	± 6

Для исследования горизонтальных движений в пределах Шикотана в разных блоках были основаны четыре пункта наблюдений, представляющие собой бетонные тумбы, заложенные на скальном основании доминирующих высот (высота 226 — пункт «Цунами», высота 412 — пункт «Ближняя», высота 210 — «Горобец», высота 357 — «Натора»). На всех перечисленных пунктах предусмотрено принудительное центрирование приборов с точностью $\geq 0,5$ мм.

Пункты были заложены в июле — августе 1973 г., а в августе 1973 г. проведены первые светодальномерные измерения с пункта «Цунами». Измерялись три линии: «Цунами» — «Ближняя», «Цунами» — «Горобец», «Цунами» — «Натора», длиной от 2 до 16 км. Наблюдения производились комплектом геодезического светодальномера СГ-3 (№ 103003).

Большую часть года на Шикотане нельзя вести наблюдения из-за густых туманов. Кроме того, высокая влажность приводит к деполяризации приходящего светового сигнала. По данным гидрометеослужбы острова, наиболее благоприятные месяцы (ясная погода) сентябрь — октябрь; к этому времени и старались приурочить наблюдения.

В полевой сезон 1973 г. была сделана попытка круглосуточных измерений с целью получения закономерности временного хода метеорологической поправки. Но из-за неустойчивой погоды непрерывных измерений провести не удалось, и каждая линия измерялась в течение нескольких суток в часы видимости. Повторные измерения проводились в сентябре 1974 г. Программа наблюдений была такой же, как и в предшествующий год.

Так как из опыта светодальномерных измерений установлено, что оптимальное время измерений — ночное (ввиду меньшего температурного градиента вдоль луча), то в 1974 г. измерения проводились в основном ночью. Метеоданные снимались на концах измеряемой линии (у прибора и отражателя). Точность измерения полностью определялась состоянием атмосферы и степенью ее изученности.

За длину линии принято среднее из серии измерений. Средняя квадратическая ошибка вычислялась по внутренней сходимости. Временной ход результатов измерений и метеопоправки для всех трех линий приведены на графиках, а результаты измерений в таблице.

Сравнение результатов измерений двух полевых сезонов показывает, что движения между пунктами «Цунами» — «Ближняя» не превышает величины ошибок измерения, а между пунктами «Цунами» — «Горобец» и «Цунами» — «Натора» произошло сжатие на величину порядка 2 см.

Повторные измерения на о. Шикотан показали, что реально существующие подвижки превышают возможные ошибки измерений, однако материал, описывающий динамику процесса, могут дать лишь непрерывные измерения.

СМЕЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
В РАЙОНЕ КАРЫМСКОГО ВУЛКАНА
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ 1972—1974 гг.

Одна из важных задач геологии наших дней — установление степени взаимосвязи тектоники и вулканизма. Сложность этой задачи очевидна из противоречивых выводов, сделанных разными исследователями в ходе изучения геологии Камчатки.

Применение геофизических методов и, в частности, высокоточных геодезических измерений, позволяющих получить количественные данные о смещениях земной поверхности практически на неограниченной площади, должно способствовать решению многих спорных вопросов этой проблемы.

Для постановки геодезических измерений удобны районы активных действующих вулканов, приуроченных к одной грабен-синклинали. Поэтому исследования геодезическими методами начаты на наиболее доступной Жупановской субкольцевой вулcano-тектонической структуре, располагающейся на междуречье Жупановая — Новый Семячик в центральной части восточного побережья Камчатки. В пределах этой структуры сконцентрировано 14 вулканических аппаратов разного возраста.

Сведения о скоростях современных движений в данном районе как в период покоя вулканов, так и во время их извержений отсутствуют. Установлено, что за четвертичный период смещения на центральном участке структуры достигли 1500 м.

Общий проект геодезических измерений, который начал полностью осуществляться в 1975 г., охватывает всю Жупановскую структуру. Объем выполненных здесь геодезических измерений изображен на рис. 1. Повторными измерениями охвачена только зона деятельности Карымского вулкана.

Геолого-тектоническое строение Карымского вулкана приведено в [1]. Вулкан опоясан кальдерой, являющейся остатком древнего вулканического сооружения; имеет форму почти правильного конуса; абсолютная высота его 1510,7 м; крутизна склонов 28—30°; возраст 7450 ± 200 лет; единственный действующий вулкан Камчатки, изливающий лавы дацитового состава.

В 1971 г. в окрестностях этого вулкана была создана геодезическая сеть, состоящая из замкнутого нивелирного хода длиной 17,6 км и микротриангуляции со сторонами 1—3 км.

Линия нивелирования закреплена на местности 13 скальными и 23 грунтовыми реперами. Закладка грунтовых реперов произведена котлованным способом. Грунтовый репер представляет собой асбоцементную трубу длиной 2,7—2,9 м и диаметром 120 мм. Труба залита раствором бетона, а в верхнюю часть ее зацементирована латунная либо чугунная марка. Репер имеет бетонный якорь размером $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ м. Скальные реперы заложены в массивные выступы светло-серых андезито-базальтовых лав, относящихся к деятельности древнего вулкана и в настоящее время покрытых пирокластическими отложениями извержений последних лет.

Сеть микротриангуляции расширялась из года в год. Из 19 пунктов, заложенных в 1971 г., 11 имеют грунтовые знаки глубиной закладки от 1,20 до 3,00 м, 8 — скальные центры.

Через год после закладки, т. е. в июле — августе 1972 г., выполнены исходные измерения. Они включают нивелирование 1-го класса по замкнутому ходу; измерение горизонтальных и вертикальных углов на

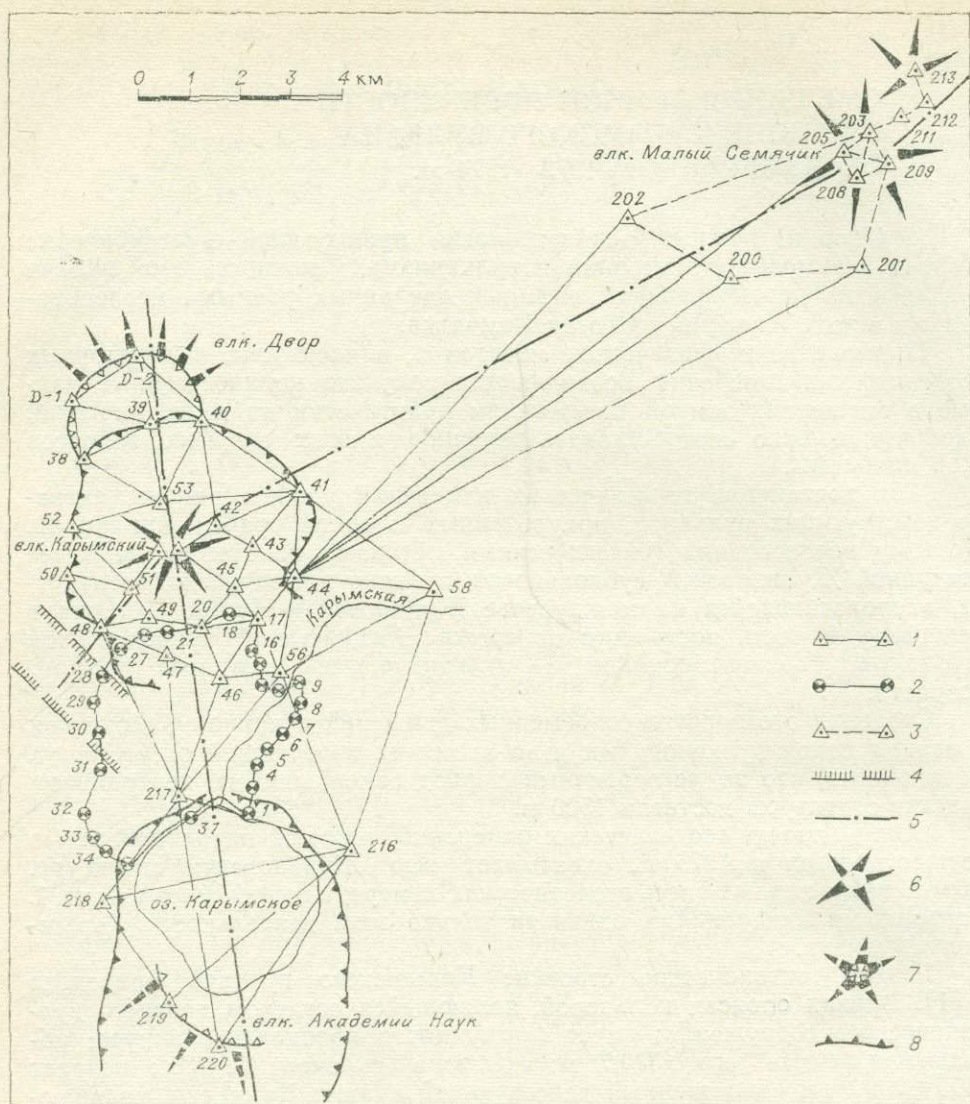


Рис. 1. Схема геодезических построений в районе Карымского вулкана.

1 — сеть триангуляции; 2 — нивелирный ход; 3 — полигонометрический ход; 4 — радиальные трещины с направлением смещения; 5 — разломы фундамента; 6 — действующие и 7 — разрушенные вулканы звездчатого типа; 8 — кальдеры.

21 пункте микротриангуляции; измерение линий светодальномером СГ-3. О качестве этих работ можно судить по следующим данным.

Нивелирование 1-го класса выполнено со средней квадратической случайной ошибкой (η) определения среднего превышения на 1 км двойного хода, равной $\pm 0,44$ мм. Ошибка определения отметки репера в наиболее слабом месте (m_H) составляет $\pm 1,6$ мм.

Измерение горизонтальных углов выполнено теодолитом Т2 12 приемами. Точность измерения угла (m_a) равна $\pm 2''$. Ошибка определения координат ($m_{x,y}$) пункта, удаленного от исходного, равна $\pm 6-7$ см. Измерение вертикальных углов (тригонометрическое нивелирование) выполнено тем же теодолитом Т2 4 приемами. Точность определения отметок пунктов микротриангуляции (m_H) ± 4 см.

В сети измерено 2 линии (17—20, 17—44) с точностью (m_s) $\pm 6-7$ мм.

Вид измерения	Величина ошибки		
	1972 г.	1973 г.	1974 г.
Геометрическое нивелирование 1-го класса (η), мм/км	±0,44	±0,57	±0,48
Невязка в полигоне, мм	—6,8	—3,9	—
Ошибка определения отметки репера в наиболее слабом месте (m_H), мм	±1,6	±2,9	±2,4
Тригонометрическое нивелирование, средняя ошибка определения отметки пункта в сети (m_H), см	±4	±4	±3
Измерение горизонтальных углов (m_α) . .	±2,1	2,3	2,2
Ошибка определения координат в наиболее слабом месте (m_x, y), см	±6—7	±7	±6—7
Измерение линий (при средней длине 1,5—2,0 км), мм	±6—7	±6—7	±6—7

В 1973 г. эти же измерения были повторены, а количество измеренных линий доведено до 7. Предыдущие измерения повторили также в 1974 г. Плановая сеть была расширена, и триангуляционными наблюдениями охвачены остатки древнего вулкана, ныне названного им. Академии наук. Измерили 28 линий длиной от 0,7 до 17,6 км светодальномером СГ-3 и 14 линий — светодальномером «Кристалл». Этим самым геодезическими сетями связаны три вулканические постройки.

Качественные характеристики измерений 1973—1974 гг., а для сравнения и 1972 г. приведены в таблице.

Что касается оценки качества нивелирования 1-го класса с точки зрения накопления систематических ошибок, то, на наш взгляд, при анализе точности высокоточного нивелирования в горных условиях, где отрицательные и положительные уклоны чередуются от участка к участку, систематические ошибки нивелирования следует подразделять на знакопеременные ($\sigma_{\text{знп}}$) и остаточные ($\sigma_{\text{ост}}$). Установление порядка величин этих ошибок требует специальных исследований. Наши примерные оценки показывают, что $\sigma_{\text{ост}}$ колеблется от 0,06 до 0,09 мм на 1 км двойного хода, а $\sigma_{\text{знп}}$ доходит до ±0,40 мм.

По результатам нивелирования 1972—1974 гг. построены графики изменения отметок реперов (рис. 2). Этот график неполный, так как из-за нарастающего снежного покрова вдоль берега оз. Карымского полигон не удалось замкнуть. Поскольку непронивелированной осталась наиболее удаленная от вулкана часть, то наши сведения о деформациях привулканической зоны можно считать полными.

Результаты тригонометрического нивелирования уравнивались способом приближений. В качестве исходных данных взяты отметки пунктов 17 и 20, известные из геометрического нивелирования. Для получения горизонтальных сдвигов путем сравнения координат пунктов сеть микротриангуляции уравнена на ЭЦВМ М-220 по стандартной производственной программе. В качестве исходных данных при всех трех уравниваниях взяты пункты 17 и 20. Линейные измерения обработаны по принятым в геодезии методам, вычисления длин линий выполнены на ЭВМ «Наири».

На основании приведенного комплекса геодезических измерений по разностям результатов 1974—1972 гг. составлена приближенная схема смещений земной поверхности в районе Карымского вулкана в конце момента его очередной активной деятельности (рис. 3).

Подобные схемы были составлены нами отдельно по разностям измерений 1973—1972 и 1974—1973 гг. Общим для этих схем явилось совпадение зон активных смещений. Если в 1973 г. по сравнению

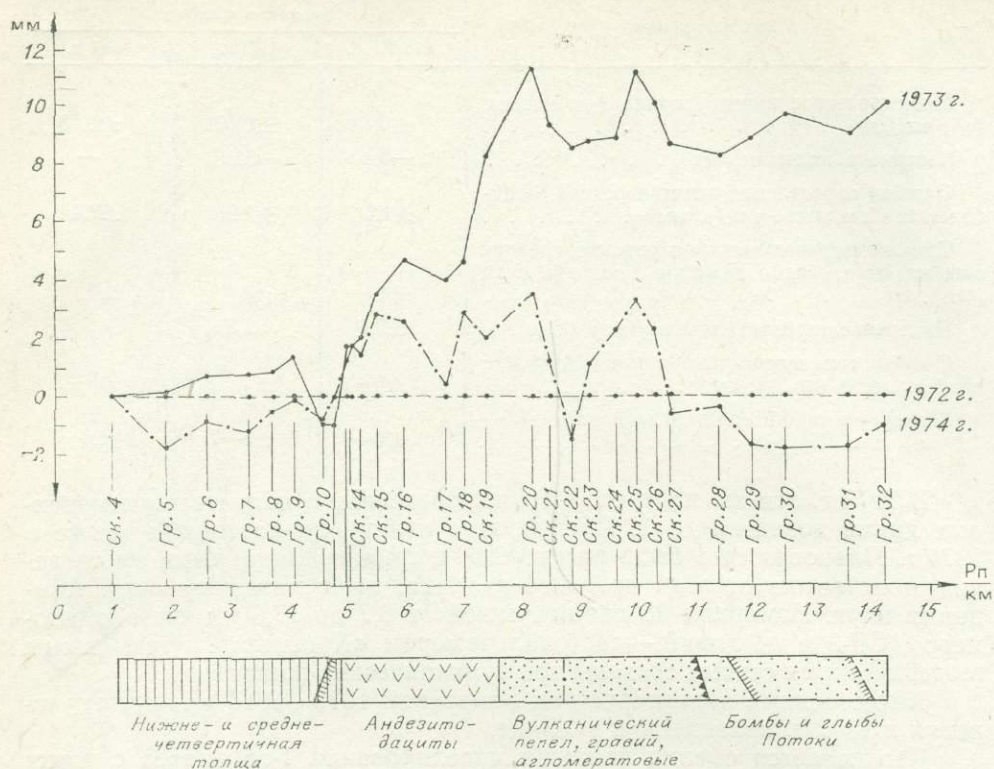


Рис. 2. Графики изменения отметок реперов по измерениям 1972—1974 гг.

с 1972 г. наблюдалось поднятие участка, расположенного западнее от центра конуса вулкана, примерно на 32 см, а также поднятие восточного участка на 20 см, то в 1974 г. по сравнению с 1973 г. на этих участках, наоборот, произошли опускания соответственно на 10 и 20 см. (На схемах вершина конуса не проявила себя только потому, что на ней не было точек наблюдений. Этот недостаток исправлен только в 1974 г.)

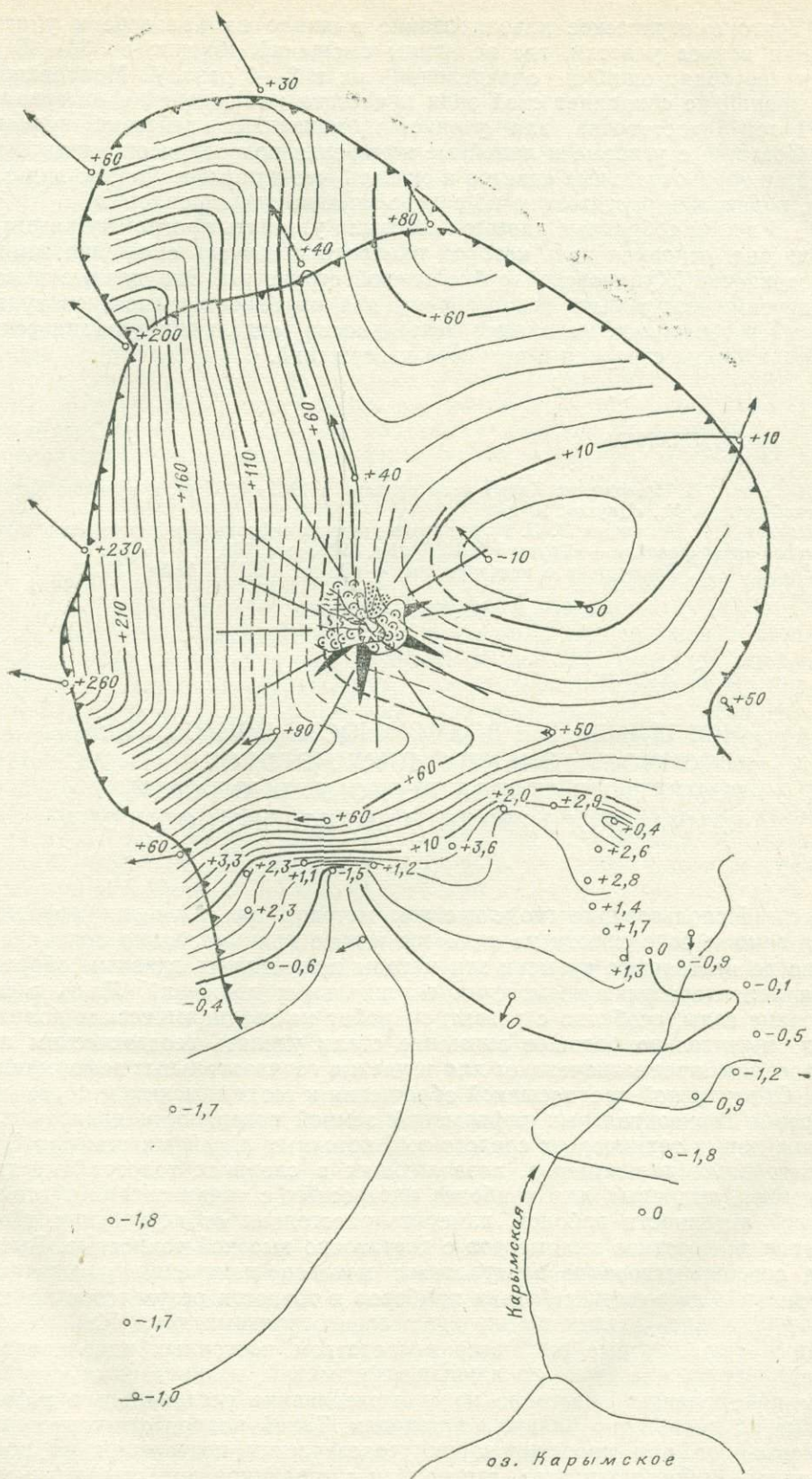
Аналогичный характер смещений, но на порядок меньше по величине показали результаты геометрического нивелирования (см. рис. 2). Жизнь вулкана в 1973 г. активизировалась. Характер горизонтальных подвижек прослежен нами по расхождениям координат пунктов. Хотя этот метод имеет известные недостатки, все же он позволил довольно однозначно сказать, что векторы горизонтальных смещений разделяются по величине и направлению по линии разлома фундамента северо-восточного направления.

Несмотря на возможные значительные ошибки в определении величин векторов, характер их направлений говорит о наличии в этом районе зоны растяжения северо-западного направления.

Направление векторов смещений подтверждается повторными измерениями линий, выполненными светодальномером СГ-3. Обобщая результаты измерений 1972—1974 гг. можно сказать:

1. Графики изменения отметок реперов однозначно фиксируют геологические нарушения по трассе нивелирования. 2. По мере приближения к постройке конуса вулкана смещения земной поверхности растут.

Рис. 3. Схема вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности вблизи Карымского вулкана по разностям измерений 1974—1972 гг. Вертикальные смещения изображены линиями равных осадков, которые до +10 мм проведены через 1 мм, дальше через 10 мм. Горизонтальные смещения изображены векторами, масштабом 2 мм: 1 см. В центре — излившиеся в 1962—1965 гг. с кратера Карымского вулкана лавовые потоки.



3. Тригонометрическое нивелирование выявило на кальдере и у основания конуса участки, где величины смещений доходят до 30—40 см и превосходят ошибки определения их в 3—4 раза. 4. Направление смещений не сохраняет свой знак и частота наблюдений с интервалом в 1 год недостаточна для уточнения механизма действия вулкана. 5. Повторные угловые и линейные измерения позволили определить характер горизонтальных сдвигов и сказать, что данный район, по-видимому, подвержен растяжению по северо-западному направлению.

В целом собранные данные позволили уточнить программу развития полигона, основная цель которой измерять и изучать смещения земной поверхности Жупановской субкольцевой структуры. Эти данные вместе с другими могут быть использованы для изучения взаимосвязи вулканизма и тектоники, механизма деятельности отдельных вулканических аппаратов, их строения и прогноза извержений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б. В. Извержения Карымского вулкана в 1962—1965 гг. и вулканы Карымской группы. М., «Наука», 1970.
2. Изотов А. А., Пеллинен Л. П. Исследования земной рефракции и методов геодезического нивелирования.— «Труды ЦНИИГАиК», 1955, вып. 102.
3. Энтин И. И. Высоточное нивелирование.— «Труды ЦНИИГАиК», 1956, вып. 111.

В. В. Злотин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СТОРОН РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ КАМЧАТСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Использование геодезических методов для изучения деформаций земной поверхности не является чем-то принципиально новым, однако до настоящего времени эти методы применялись главным образом для характеристики возможных вертикальных движений. Лишь в последние годы, особенно с развитием работ на геодинимических полигонах, значительно большее внимание стали уделять геодезическим построениям, предназначенным для изучения горизонтальных деформаций.

Объективной предпосылкой обращения к геодезическим методам измерения горизонтальных деформаций земной поверхности явилось создание новых технических средств высокоточных линейных измерений — электронных дальномеров, позволяющих в сложных топографических условиях, типичных для наиболее интересных с точки зрения тектонической активности районов, измерять расстояния от нескольких сотен метров до десятков километров с достаточно высокой точностью. Быстрое совершенствование электронных методов измерения расстояний, увеличение дальности действия приборов и точности результатов позволили поставить задачи по изучению горизонтальных движений, аналогичные тем, которые решаются посредством повторных нивелировок, т. е. изучение не только локальных деформаций, приуроченных к районам действующих разломов, но и исследование региональных деформаций на достаточно больших площадях. Такой подход отчетливо вырисовывался при проектировании геодезических построений на всех геодинимических полигонах, где наряду с традиционными нивелирными

сетями создаются линейные и линейно-угловые построения на всей площади полигона, наблюдения в которых предполагается выполнять несколькими циклами в течение нескольких лет.

Особый интерес с точки зрения характера региональных и локальных движений представляет собой Камчатский геодинамический полигон, охватывающий один из самых сейсмоактивных районов нашей страны. Своеобразие физико-географических условий и задач, характерных для этого района, обусловило принципиально новые требования к геодезическому обеспечению Камчатского полигона. Несмотря на всю сложность выдвинутой Институтом вулканологии ДВНЦ АН СССР программы геодезического обеспечения Камчатского геодинамического полигона, она была принципиально одобрена ГУГК при СМ СССР, поручившего ЦНИИГАиК и предприятию ГУГК приступить к ее реализации. Программой ИВ ДВНЦ АН СССР, подробное изложение и обоснование которой будет дано ниже, предусматриваются большие работы по изучению региональных горизонтальных движений геодезическими методами, преимущественно путем построения линейных сетей, с использованием электронных дальномеров. Хотя при обсуждении возможности выполнения отдельных пунктов программы и не возникло принципиальных возражений, стало очевидно, что в большинстве случаев для обеспечения достаточно высокой точности определения взаимного положения пунктов потребуются не обычные, опробованные в других районах методы измерений, а специальная, учитывающая конкретные условия Камчатского полигона, методика геодезических работ. Особенно неясными представлялись вопросы объективной оценки степени влияния внешних условий на результаты измерений электронными дальномерами расстояний свыше 50 км, так как опытные данные по подобным измерениям как в СССР, так и за рубежом весьма ограничены, а априорные оценки крайне противоречивы. Не менее важными, разумеется, были и вопросы об оптимальной программе измерений, т. е. продолжительности, распределении наблюдений по времени суток, необходимости дополнительной информации о метеорологических условиях и т. д., так как без решения этой задачи невозможно объективно оценить необходимые в будущем затраты и мощности для выполнения одного цикла наблюдений всех построений.

Таким образом, возникла необходимость выполнить предварительные исследования, позволяющие хотя бы в первом приближении ответить на возникшие вопросы, связанные со спецификой задач геодезического обеспечения Камчатского полигона в плане изучения региональных деформаций земной поверхности.

Вполне естественно, что решение задачи о степени достоверности информации, полученной геодезическими методами, представляет обоюдный интерес как для потребителей (геофизиков), так и для исполнителей (геодезистов), поэтому была поставлена совместная работа по изучению возможности применения и точности электронных методов измерения расстояний в условиях Камчатского геодинамического полигона. Работа эта выполнялась ИВ ДВНЦ АН СССР и ЦНИИГАиК ГУГК при СМ СССР.

Экспериментальные наблюдения, имеющие целью получить опытные данные по возможности применения и точности электронных методов измерения расстояний в условиях Камчатского геодинамического полигона, в 1972 г. были выполнены на линиях запроектированного в районе Авачинской группы вулканов радиального построения, а также на трех линиях одного из треугольников сети трилатерации, предназначенной для связи основных хребтов и восточных мысов Камчатки; в 1973 г. они были продолжены на тех же линиях и на линиях второго треугольника трилатерации. Схема расположения пунктов и измеренных линий приведена на рис. 1.

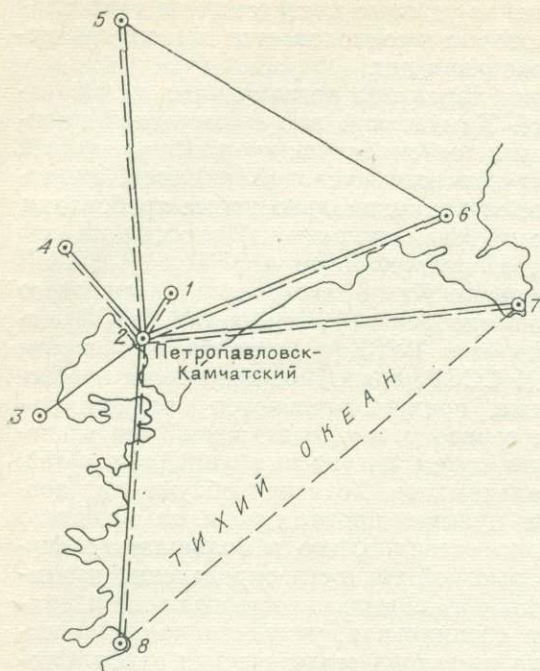


Рис. 1. Схема расположения линий.

Пункты: 1 — Базисный (высота 180 м); 2 — Мишенная (387 м); 3 — Сельдевая (712 м); 4 — Седло (1111 м); 5 — Ганалы (1960 м); 6 — 925 (925 м); 7 — Шилунский (241 м); 8 — Пирамидный (697 м).

Длина линий: 1-2 — 6,9 км; 2-3 — 23,4 км; 2-4 — 33,5 км; 2-5 — 96,4 км; 2-6 — 81,9 км; 2-7 — 92,8 км; 2-8 — 72,2 км; 5-6 — 140,5 км; 7-8 — 126,5 км.

Сплошной линией обозначены светодальномерные измерения, штриховой — радиодальномерные.

Район работ различается по своим физико-географическим условиям, большие колебания высот пунктов и разнообразие подстилающей поверхности по трассам («морские» и «сухопутные»), залесенные и тундровые) обеспечивают существование различных сочетания точек зрения распространения

электромагнитных волн, а следовательно, и влияния внешних факторов на результаты измерений электронными дальномерами.

Комплекс экспериментальных работ, выполненный в этот период¹, включал: а) продолжительные одновременные измерения свето- и радиодальномерами сторон длиной от 20 до 100 км; б) радиодальномерные измерения линий до 150 км, проходящих над различными подстилающими поверхностями; в) самолетное и аэростатное зондирование атмосферы с целью прямого определения метеоданных вдоль траектории излучения непосредственно в момент измерения электронными дальномерами; г) градиентные измерения метеоданных на конечных пунктах с целью оценки непредставительности метеоданных и возможности использования такой дополнительной информации.

При экспериментальных измерениях использовались серийные электронные дальномеры «Геодимер 8» и «Луч» [3]; для градиентных измерений применялись дистанционные электропсихрометры ЦНИИГАиК [1]; измерения метеоданных по траектории распространения излучения выполнялись при помощи самолетного метеорографа ЭМ ЦАО, установленного на самолете АН-2, а данные по аэростатному зондированию были получены с аэрологической станции КУГМС, находившейся в районе работ. Электронные дальномеры использовались без каких-либо существенных переделок, однако были приняты некоторые меры для повышения уровня сигнала (применение антенн увеличенного диаметра в радиодальномере и большие, чем обычно, отражатели при светодальномерных измерениях; более тщательная настройка приёмных устройств и отбор более мощных клистронов и т. д.).

Планируя исследования, мы не располагали достаточно надежными экспериментальными данными, которые позволили бы ясно представлять все особенности процесса измерений больших расстояний. Вместе с тем мы ожидали, что наибольшие осложнения при радиодальномерных измерениях должны возникнуть на линиях, проходящих над мо-

¹ Продолжительность периода наблюдений непосредственно на объекте составляла 30—35 дней ежегодно в течение августа — сентября.

рем, а при светодальномерных измерениях — на наиболее длинных линиях с небольшой высотой траектории над подстилающей поверхностью, где ослабление и флуктуации светового потока должны быть наибольшими.

В результате исследований удалось показать, что основной причиной осложнения процесса радиодальномерных измерений на «морских» трассах является турбулентный характер поля показателя преломления, обуславливающий быстрые флуктуации электрического (оптического) пути, а также суточный ход рефракции, определяющий медленные изменения величины и фазы сигналов, принимаемых станциями радиодальномера. Указанные причины приводят, во-первых, к заметным колебаниям значений времени прохождения, измеряемого на одной и той же несущей частоте, и, во-вторых, к длительным (иногда до нескольких часов) и столь глубоким замираниям сигнала, что измерения вообще не удается выполнить. Вместе с тем данное явление играет и положительную роль, поскольку в этом случае наиболее существенная при радиодальномерных измерениях ошибка из-за отражения носит случайный характер и в значительной степени ослабляется при достаточном времени наблюдений.

При светодальномерных измерениях основная трудность заключалась в точном измерении и удержании светового луча на отражателе, так как на больших расстояниях обнаружить отраженный сигнал зачастую визуально невозможно, а время изменения угла рефракции на величину расхождения светового пучка составляло иногда $5\div 7$ с. Кроме того, процесс светодальномерных измерений сильно осложнялся значительными флуктуациями оптического пути, период которых сравним с периодом фазовой индикации.

Однако несмотря на трудности процесса измерений электронными дальномерами больших расстояний, удалось найти методические приемы, которые позволили получать надежные значения разности фаз, соответствующие конкретным метеорологическим условиям и тем самым достоверно характеризовать влияние внешних факторов. На основании экспериментальных наблюдений удалось показать, что предельные дальности для современных светодальномеров составляют 100 км, а для радиодальномеров — 150 км, причем ошибка фазовой индикации остается практически такой же, как и при расстояниях $20\div 30$ км.

Все вопросы, связанные с методикой измерения больших расстояний свето- и радиодальномерами, детально рассмотрены в [2, 4]. В общей совокупности вопросов, подлежащих решению при разработке этой методики, обеспечивающей достаточно высокую точность результатов в условиях, типичных для Камчатского полигона, пожалуй, наиболее важным является вопрос о возможной точности определения показателя преломления. Большие длины сторон, сложные топографические и метеорологические условия, ограниченность периодов, пригодных для измерений, — все эти факторы существенно влияют на величину ошибки определения рабочей скорости электромагнитных волн по данным метеорологических наблюдений и в конечном счете на результирующую точность свето- и радиодальномерных измерений. Поэтому при проведении экспериментальных измерений мы стремились прежде всего собрать, достаточно обширный материал, по которому можно было бы судить о величине и характере непредставительности метеоданных. Кроме того, необходимо было изучить и характер расхождений результатов свето- и радиодальномерных измерений, обусловленных различным влиянием температуры и влажности на показатель преломления воздуха для волн оптического и радиодиапазона с целью подтверждения или опровержения выдвинутого рядом исследователей предположения о систематическом характере этих расхождений.

Таблица 1

№ п/п	D, км	$\bar{H}$, м	$\Delta D_{\max}$		$\frac{\Delta D_{\max}}{D} \cdot 10^6$		$\Delta D_{p/c}$, см	$\frac{\Delta D_{p/c}}{D} \cdot 10^6$	$\Delta D'_{p/c}$
			Измерения, см						
			свето- дально- мерные	радио- дально- мерные	свето- дально- мерные	радио- дально- мерные			
1	6,9	150	3	8	4,4*	11,6	—	—	—
2	23,4	540	15	—	6,4	—	—	—	—
3	33,5	700	22	34	6,0	10,1	—32	9,5	—32
4	72,2	500	39	65	5,4	9,0	—43	6,0	—46
5	81,9	650	70	84	8,5	10,3	—34	4,2	—42
6	92,8*	250	50	105	—	11,3	—6	0,6	—22
7	96,4*	1100	27	—	—	—	—53	5,5	—68
8	126,5	470	—	148	—	11,7	—	—	—
Среднее . . .					6,1	10,7		5,2	

* Ограниченные ряды светодальномерных измерений.

Здесь следует подчеркнуть особую важность последнего, поскольку систематические различия между результатами свето- и радиодальномерных измерений могут привести к ложной интерпретации расхождений в значениях длин сторон при последующих циклах наблюдений, если в разных циклах измерения будут выполнены различными приборами.

Для оценки величины ошибки представительства метеоданных в табл. 1 приведены характеристики сходимости рядов измерений в обоих диапазонах для тех линий, где наблюдениями охвачены все возможные погодные условия и периоды суток. Каждая из включенных в таблицу линий представляет собой определенный тип трассы, причем трассы линий 2, 4, 6 и 8 относятся к «морским», а остальные — к «сухопутным». В табл. 1 приняты следующие обозначения:

$\Delta D_{\max} = D_{\max} - D_{\min}$ — максимальные колебания значений дальности по всей программе; $\Delta D_{p/c} = \bar{D}_p - \bar{D}_c$ — разность средних значений дальностей, полученных по одновременным измерениям в оптическом и радиодиапазоне; $\bar{H}$ — средняя высота траектории над подстилающей поверхностью; $\Delta D'_{p/c}$ — значения разностей $\Delta D_{p/c}$, полученные по этим же наблюдениям, но с учетом возможных искажений, обусловленных кривизной Земли и вертикальным градиентом, точнее различием вертикального градиента показателя преломления для световых и радиоволн [6].

Как видно из приведенных данных, величины $\Delta D_{\max}$, характеризующие ошибку определения рабочей скорости, точнее ее переменную часть, для обоих диапазонов практически линейно зависят от расстояния D , а средняя относительная величина $\left(\frac{\Delta D_{\max}}{D}\right)$ составляет $6 \cdot 10^{-6}$ и $11 \cdot 10^{-6}$

соответственно для волн оптического и радиодиапазона. При формальном подходе следовало бы для относительной ошибки одного измерения, обусловленной непосредственностью метеоданных, принять следующие значения: $2,5 \cdot 10^{-6}$ для светодальномера и $3,2 \cdot 10^{-6}$ для радиодальномера, т. е. сделать вывод о возможности без особого труда достигать результирующей точности $1 \cdot 10^{-6}$ и $2 \cdot 10^{-6}$ соответственно при работе со свето- и радиодальномерами, увеличив число наблюдений

до 3—5. Однако обнаруженное по этим же наблюдениям заметное систематическое различие между свето- и радиодальномерными измерениями и наличие явно выраженного суточного хода в результатах светодальномерных измерений не позволили ограничиться такими простыми рекомендациями.

Детальный анализ всех измерений показал, что характерной особенностью светодальномерных измерений является преуменьшение дальности в ночной период по сравнению с дневным, причем средняя относительная величина уклонения ночных и дневных значений от «истинного» (полученного по метеоданным, определенным непосредственно по пути распространения излучения) составляет соответственно $-1,5 \cdot 10^{-6}$ и $+2,5 \cdot 10^{-6}$.

Зависимость результатов радиодальномерных измерений от времени суток, как правило, случайна, и лишь в дневные часы ясных теплых дней наблюдается заметное преуменьшение дальностей по сравнению с другими периодами. Значения разностей одновременных радио- и светодальномерных измерений всегда отрицательны, но не постоянны даже на одной и той же линии и существенно зависят как от погодных условий, так и от времени наблюдений. (Типичный график разности радио- и светодальномерных измерений в течение 16 ч на одной из линий, длиной 72,2 км приведен на рис. 2.)

Указанные закономерности искажений результатов измерений электронными дальномерами связаны с условиями, характерными для Камчатского полигона, где средняя высота траектории распространения электромагнитных волн над подстилающей поверхностью достаточно (до нескольких сотен метров) велика. Иными словами, на всех линиях траектория луча практически на всем протяжении проходит в свободной атмосфере, в то время как метеорологические наблюдения, выполняемые в конечных точках траектории, относятся к приземному, высотой всего несколько метров, слою. Вполне естественно предположить, что на достаточно больших высотах над подстилающей поверхностью, благодаря турбулентному обмену, поле показателя преломления не может иметь сколько-нибудь заметных устойчивых неоднородностей, связанных с неоднородностью подстилающей поверхности. Следовательно, основным фактором, определяющим различие среднего ($N_{ср}$) и среднеинтегрального ($\bar{N}$) значений показателя преломления, являются искажения наблюдаемых метеоданных, обусловленных близостью подстилающей поверхности в конечных точках траектории.

Описанный выше механизм образования несоответствия между наблюдаемыми в конечных точках траектории метеоданными и значениями их по пути распространения излучения и закономерности искажений результатов измерений электронными дальномерами хорошо подтверждаются и результатами специальных метеорологических наблюдений. В табл. 2 приведены разности одновременных измерений температуры ($\Delta t^\circ\text{C}$) и влажности (Δl мм рт. ст.) в трех точках, причем $o-h$ — разность показаний приборов, расположенных на пункте на высотах 1,5 и 14 м, а $O-H$ — разность между значениями метеоданных, измеренных на пункте на высоте 1,5 м и на абсолютной высоте пункта в свободной атмосфере в 3—5 км от него. В этой же таблице приведены и разли-

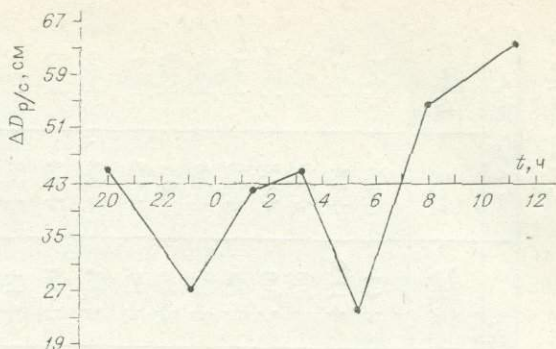


Рис. 2. График разности $\Delta D_{p/c}$ радио- и светодальномерных измерений на линии 72,2 км.

Таблица 2

Дата (1973 г.)	Время	$\Delta t^{\circ}\text{C}$		Δl , мм рт. ст.		ΔN_{o-h}		ΔN_{O-H}		$\Delta N_p - \Delta N_c$	
		$o-h$	$O-H$	$o-h$	$O-H$	световые волны	радио- волны	световые волны	радио- волны	$o-h$	$O-H$
20.08	4 ^h 30 ^m	-1,4	-1,8	+0,2	+0,3	+1,4	+2,9	+1,8	+4,1	+1,5	+2,3
20.08	16 30	+0,6	+1,0	+0,8	+2,2	-0,6	+3,8	-1,0	+11,0	+4,4	+12,0
21.08	10 30	+1,7	+2,2	+0,6	+1,2	-1,7	+1,2	-2,2	+3,8	+2,9	+6,0
11	16 30	+1,6	+2,4	+1,4	+2,0	-1,6	+5,7	-2,4	+8,0	+7,3	+10,4
23.08	10 30	+1,2	+1,3	+0,9	+1,7	-1,2	+3,4	-1,3	+7,8	+3,6	+9,1
23.08	16 30	+1,9	+2,1	+0,6	+0,7	-1,9	+0,9	-2,1	+1,2	+2,8	+3,3
23.08	22 30	-0,4	-0,9	+0,5	+0,5	+0,4	+3,3	+0,9	+4,0	3,7	+4,9
24.08	4 30	-0,2	0,0	+0,3	+0,3	+0,2	+2,0	0,0	+1,7	+2,2	+1,7
24.08	10 30	+1,3	+2,5	+1,2	+1,0	-1,3	+5,0	-2,5	+2,4	+6,3	+4,9
24.08	16 30	+0,9	+2,0	+0,3	+0,7	-0,9	+0,5	-2,0	+3,0	+1,4	+5,0
24.08	22 30	-1,0	-0,4	+0,9	+0,6	+1,0	+6,3	+0,4	+4,1	+5,3	+3,7
31.08	16 30	+2,3	+2,9	+0,6	+1,1	-2,3	+0,4	-2,9	+2,4	+2,7	+5,3
3.09	16 30	+1,4	+1,6	+0,9	+1,5	-1,4	+3,1	-1,6	+7,3	+4,5	+8,9
3.09	22 30	-1,0	-0,8	+0,4	+0,5	+1,0	+3,5	+0,8	+3,8	+2,5	+3,0
4.09	10 30	+2,4	+2,6	+1,0	+1,6	-2,4	+2,5	-2,6	+5,7	+5,9	+7,3
4.09	16 30	+2,0	+3,4	+1,2	+1,5	-2,0	+4,1	-3,4	+4,0	+6,1	+7,4
4.09	22 30	-0,6	-2,5	+0,5	+1,0	+0,6	+3,6	+2,5	+8,8	+3,0	+6,3
5.09	4 30	-1,1	-1,1	+0,6	+0,8	+1,1	+4,9	+1,1	+5,9	+3,6	+4,8
5.09	10 30	+1,0	+1,6	+0,7	+0,7	-1,0	+2,6	-1,6	+1,8	+3,6	+3,4
5.09	16 30	+2,5	+2,9	+1,0	+1,1	-2,5	+3,9	-2,9	+2,4	+6,4	+5,3
Среднее . . .		+0,70	+1,04	+0,76	+1,05	-0,70	+3,17	-1,05	+4,69	+3,88	+5,75

чия (ΔN) в показателе преломления (в N -единицах), соответствующие разностям метеоданных.

Данные табл. 2 не только подтверждают указанный выше характер ошибок представительства метеоданных, но и позволяют сделать вывод о том, что градиентные наблюдения (разности « $o - h$ ») достаточно точно характеризуют тенденцию искажения метеоданных, т. е. истинные искажения (разности « $O - H$ ») имеют тот же знак и пропорциональны величинам « $o - h$ ». Это обстоятельство позволило предложить новый способ уменьшения ошибок определения рабочей скорости, основанный на введении поправок, вычисляемых по разностям значений дальности, измеренных в оптическом и радиодиапазоне, и коэффициентам, определяемым по градиентным наблюдениям на пунктах [5].

Результаты измерений, выполненных в 1972—1973 гг., позволяют утверждать, что при развитии региональных геодезических сетей в условиях Камчатского геодинамического полигона возможно и целесообразно применять электронные дальномеры, причем может быть достигнута точность определения взаимного положения пунктов таких сетей $1 \cdot 10^{-6}$ (при расстояниях между ними до 50 км) и $2 \cdot 10^{-6}$ (при расстояниях до 150 км). Сравнительный анализ результатов измерений свето- и радиодальномерных измерений, полученных при различных способах учета метеоданных, позволяет сделать следующие практические рекомендации в отношении оптимальной программы и типов электронных дальнометров в зависимости от длины линий.

1. Расстояния до 50 км целесообразно измерять светодальномерами, причем для достижения ошибки $1 \cdot 10^{-6}$ необходимо и достаточно выполнить полный суточный цикл наблюдений, т. е. программа должна включать примерно одинаковое число (по 3—4 серии) измерений в дневной и ночной периоды. Способ учета метеоданных должен определяться типом трассы и, главным образом, средней высотой траектории излучения над подстилающей поверхностью. По средней высоте траектории до 200 м достаточно учитывать метеоданные на конечных пунктах, но измерения их должны выполняться на высоте не менее 10 м над землей; при больших высотах и на трассах с «корытообразным» профилем целесообразно вводить поправки за состояние атмосферы по метеоданным, определенным для средней абсолютной высоты траектории по данным непосредственного зондирования (самолетного или аэростатного), или определять температуру воздуха способом, изложенным в [1].

2. Расстояния от 50 до 100 км целесообразно измерять одновременно свето- и радиодальномерами, причем учет состояния атмосферы должен выполняться на основании разностей дальностей в оптическом и радиодиапазоне и градиентных наблюдений на конечных пунктах линии. Программа наблюдений в этом случае должна включать 4—6 серий синхронных наблюдений свето- и радиодальномером, выполненных при различных метеорологических условиях или в разное время суток. Относительная ошибка окончательного значения дальности в этом случае не превысит $2 \cdot 10^{-6}$.

3. Расстояния 100—150 км целесообразно измерять радиодальномерами, причем для учета состояния атмосферы необходимо непосредственное измерение метеоданных вдоль траектории распространения излучения. При указанном способе определения метеоданных относительная ошибка значения дальности не превысит $2 \cdot 10^{-6}$, если оно будет выведено по 3—4 независимым сериям наблюдений.

Приведенные выше величины относительных ошибок измерения линий различной длины характеризуют точность вывода абсолютных значений дальностей, поскольку рекомендованные способы учета метеоданных обеспечивают практически полное исключение систематических искажений, обусловленных непредставительностью метеоданных. При

обычном способе учета метеоданных результаты измерений электронными дальномерами могут иметь значительно большие ошибки, величина которых зависит как от диапазона используемых несущих частот и типа трассы, так и от распределения наблюдений в программе по времени суток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багрянский Л. Л. и др. Дистанционный электропсихрометр.— «Реф. сб.», 1973, № 28.
2. Бланк Л. М., Фельдман Г. А. Об опыте измерения расстояний длиной до 100 км светодальномером «Кварц» и геодинетром модели 8.— «Геодезия и картография», 1975, № 3.
3. Генике А. А., Багрянский Л. Л., Маркитесов С. В. Геодезический фазовый дальномер «Луч».— «Геодезия и картография», 1969, № 10.
4. Злотин В. В. Особенности радиодальномерных измерений, пересекающих обширные водные пространства.— «Труды ЦНИИГАиК», 1975, вып. 207.
5. Злотин В. В., Бланк Л. М. О возможности повышения точности учета показателя преломления по результатам одновременных свето- и радиодальномерных измерений.— «Труды ЦНИИГАиК», 1975, вып. 207.
6. Злотин В. В. Об учете показателя преломления при измерении больших расстояний электронными дальномерами.— «Геодезия и картография», 1973, № 10.
7. Наумов Я. В., Злотин В. В., Бланк Л. М., Галкин Ю. С. Рекомендации по геодезическим работам на геодинетрических полигонах. М., ОНТИ ЦНИИГАиК, 1975.
8. Федотов С. А., Энман В. Б. Программа геодезических работ по изучению современных движений земной коры на Камчатке.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.

СРЕДНЯЯ АЗИЯ

Н. А. Корешков, В. А. Пискулин А. П. Райзман

О СОСТОЯНИИ И НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ СРЕДНЕЙ АЗИИ

В настоящее время производственное предприятие ГУГК проводит исследования современных движений земной коры на 11 геодинимических полигонах: Ташкентском, Фрунзенском, Душанбинском, Центральные Кызылкумы, Иссык-Кульском, Гармском, Ферганском, а также Чарвакской, Нурекской, Токтогульской, Рогунской гидроэлектростанциях. Мы не будем повторять то, что изложено в опубликованных работах [1, 2], где выполнен анализ, даны интерпретация результатов геодезических измерений и научно-техническое обоснование программы и методов геодезических работ на Ташкентском, Фрунзенском, Душанбинском и Иссык-Кульском геодинимических полигонах.

Представляют интерес результаты последующих измерений: трех циклов нивелирования 1-го класса по трассе Ташкент — Чарвак, вокруг Чарвакского водохранилища, по линии. Сюжеты — Фрунзе — Ала-арча Фрунзенского полигона; по линии Зидды — Душанбе — Нурек Душанбинского полигона; четырех циклов линейно-угловых измерений 1-го класса в Чарвакском геодезическом четырехугольнике, двух циклов на полигоне Центральные Кызылкумы.

На полигонах Нурекской, Токтогульской, Рогунской гидроэлектростанций и Ферганском в 1974—1975 гг. выполнялся первый цикл геодезических измерений. Рассмотрим результаты повторных геодезических работ по каждому из этих участков.

ЛИНИЯ НИВЕЛИРОВАНИЯ 1-ГО КЛАССА ТАШКЕНТ — ЧАРВАК

Изменение высотного положения нивелирных точек на Ташкентском полигоне определяется относительно грунтового репера 12-480, расположенного в 12 км к северу от Ташкента. Установлено, что этот репер сохраняет свое положение по высоте относительно фундаментального репера 18, расположенного около станции Арысь, в 120 км к северу от Ташкента.

На рис. 1, а представлен график относительного изменения высот нивелирных знаков за 1969—1974 гг. По трассе было выполнено три цикла нивелирования 1-го класса. Из рисунка видно, что за указанный период участок земной поверхности между исходным репером 12-480 (Келес) и г. Чирчик претерпел относительное поднятие. Максимальная величина поднятия, по данным нивелирования 1974 г., равна $+17,1 \pm 5,3$ мм на пункте Карамуртепа (средняя относительная скорость поднятия более 4 мм/год). В этом месте линия нивелирования пересекает зону Ташкентского разлома. Здесь наблюдаются значительные градиенты изменения превышений между нивелирными знаками.

На исследуемом участке, по данным нивелирования 1958, 1962—1965 и 1969—1970 гг., также было выявлено аналогичное поднятие зем-

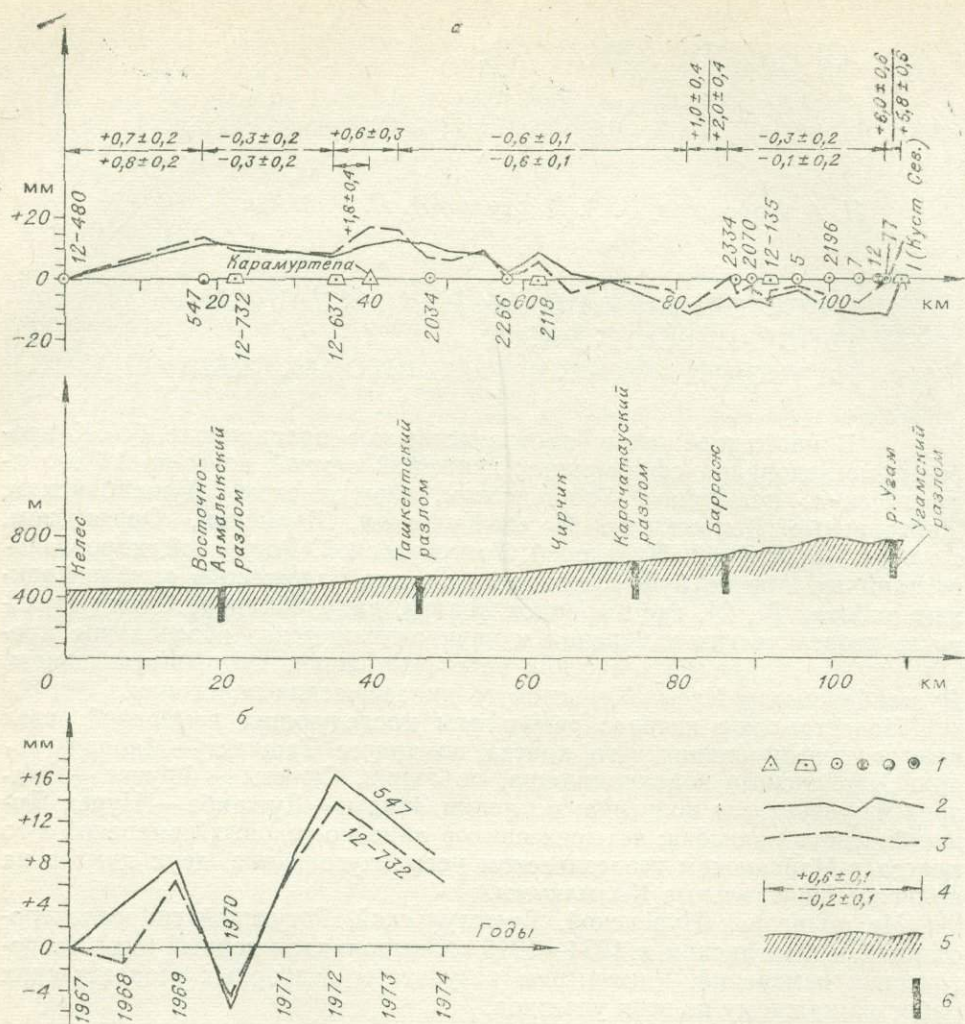


Рис. 1. Относительное изменение высот нивелирных знаков.

а — по линии нивелирования Ташкент — Чарвак; б — реперов 547 и 12-732 с 1967 по 1974 г. 1 — нивелирные знаки; 2 — изменение высот по данным нивелирования 1971, 1969—1970 гг. и 3 — 1974, 1969—1970 гг.; 4 — градиент изменения высот нивелирных знаков и возможная ошибка его определения, мм/км; в числителе — по данным нивелирования 1971 и 1969—1970 гг., в знаменателе — 1974 и 1969—1970 гг.; 5 — топографический профиль вдоль линии нивелирования; 6 — разломы в земной коре.

ной поверхности, максимальная величина которого, равная $+41,0 \pm \pm 1,6$ мм, установлена в районе расположения фундаментального репера 12-732, вблизи Центральной сейсмической станции «Ташкент».

На другом отрезке трассы нивелирования между г. Чирчик и плотиной Чарвакского водохранилища выявляется относительное прогибание земной поверхности. Наибольшие градиенты изменения относительных высот наблюдаются в зоне разлома субмеридионального направления в районе пос. Барраж и районе Угамского разлома.

По данным нивелирования 1974 и 1969—1970 гг., превышение скального репера 12, расположенного на западном крыле Угамского разлома, относительно фундаментального репера 1 (куст Северный) уменьшилось на $12,9 \pm 1,4$ мм.

На рис. 1, б показаны графики относительного изменения высот нивелирных знаков 547 и 12-732, расположенных на расстоянии 3,5 км друг от друга в зоне эпицентров землетрясений 1966 г. Эти графики иллюстрируют продолжающийся колебательный характер движений

земной поверхности в г. Ташкенте. Скорость относительного изменения высот этих точек начиная с 1969 г. порядка 10 ± 4 мм/год, а максимальная амплитуда колебания высот, установленная нивелированием 1970 и 1972 гг., около 20 ± 4 мм.

ЛИНИЯ НИВЕЛИРОВАНИЯ 1-ГО КЛАССА ВОКРУГ ЧАРВАКСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

По линии выполнено 4 цикла нивелирования: два цикла до заполнения водохранилища — в 1969 и 1970 гг. и два — в период заполнения в 1972 и 1974 гг.; последнее нивелирование выполнено только в северо-западной части водохранилища.

Заполнение водохранилища началось с конца 1970 г., а в 1972—1974 гг. объем воды был около 400 млн. куб. м.

На рис. 2 показаны графики изменения высот нивелирных знаков, расположенных по трассе нивелирования. За исходный репер, относительно которого вычислены изменения высот, принят фундаментальный репер 1 (куст Северный), расположенный вблизи плотины водохранилища. После заполнения водохранилища в северо-западной и северо-восточной частях побережья наблюдается прогиб порядка $20 \pm 0,4$ мм. Южное побережье, по данным нивелирования 1969—1970 и 1972 гг., не претерпело прогибания.

ЧАРВАКСКИЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ ЧЕТЫРЕХУГОЛЬНИК

Чарвакский геодезический четырехугольник, пункты которого расположены на хребтах вокруг водохранилища, построен в 1969 г. с целью изучения горизонтальных движений земной коры. Земная кора в этом районе разбита на многочисленные блоки сетью разломов. По

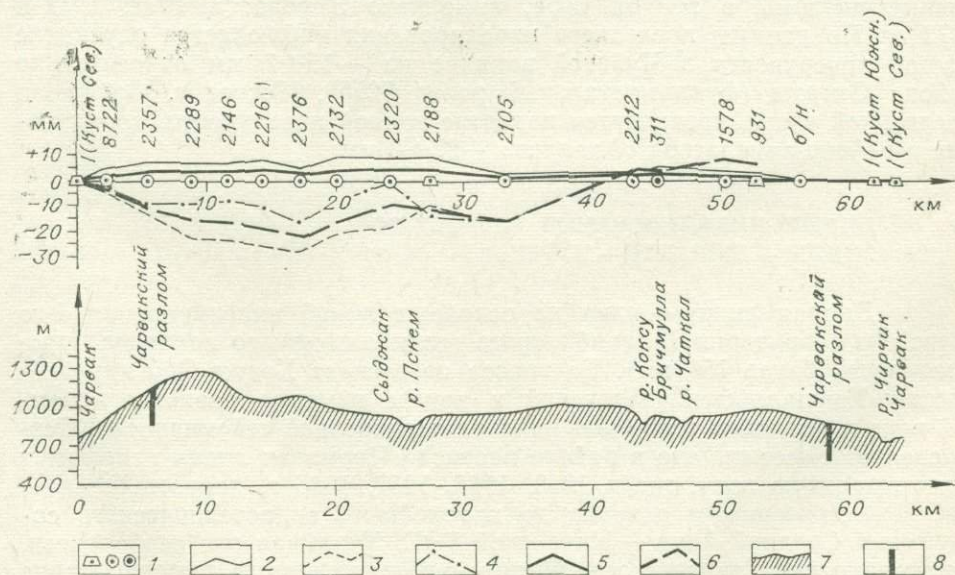


Рис. 2. Изменение высот нивелирных знаков по линии нивелирования вокруг Чарвакского водохранилища (нивелирование 1969, 1970, 1972 и 1974 гг.).

1 — нивелирные знаки; 2 — изменение высот по данным нивелирования 1970 и 1969 гг.; 3 — 1972 и 1969 гг. и 4 — 1974 и 1969 гг.; 5 — относительные изменения высот нивелирных знаков до заполнения водохранилища (1969—1970 гг.); 6 — то же, после заполнения водохранилища (1972—1974 гг.); 7 — топографический профиль вдоль линии нивелирования; 8 — разломы в земной коре.

геологическим данным, характерной особенностью строения Бричмуллинской грабен-синклинали, в которой расположено водохранилище, является надвигание на нее смежных горст-антиклиналей. В работе [1] проведен анализ триангуляционных работ, выполненных в районе Чарвака в 1954—1958 и 1969—1970 гг. В результате было установлено, что восточный пункт геодезического четырехугольника, расположенный на Пскемском хребте, изменил свое плановое положение, сместившись в западном направлении на 7 ± 3 см.

В четырехугольнике выполнено четыре цикла светодальномерных измерений в 1969, 1970, 1973 и 1974 гг. Хотя изменение длин сторон четырехугольника из разных циклов наблюдений и находится в пределах ошибок измерений, тем не менее длина диагональной его стороны «запад — восток» продолжает уменьшаться. Так, в 1970 г. по сравнению с 1969 г. уменьшение составило $1,4\pm 1,0$ см, в 1973 г. по отношению к 1970 г. — $1,0\pm 1,0$ см; в 1974 г. подтвердился результат 1973 г. Таким образом, с 1969 по 1974 г. длина этой стороны уменьшилась на $2,4\pm 1,2$ см. Средняя годовая скорость уменьшения ее длины равна $0,5\pm 0,2$ см, т. е. такая же, какая получена за 14 лет — с 1955 по 1969 г.

В 1974 г. в районе Чарвакского водохранилища созданы дополнительные геодезические построения, на которых выполнен первый цикл линейных и угловых наблюдений. Повторные линейно-угловые измерения в данном районе помогут установить степень достоверности геолого-тектонической концепции о сближении хребтов, окаймляющих водохранилище.

ЛИНИЯ НИВЕЛИРОВАНИЯ 1-ГО КЛАССА СЮЕТЫ — ФРУНЗЕ — АЛААРЧА

На Фрунзенском геодинамическом полигоне первый цикл нивелирования 1-го и 2-го классов и линейно-угловых измерений выполнен в 1971—1973 гг. Однако нивелирование 1-го класса по линии Сюеты — Фрунзе — Аларча протяженностью 100 км, пересекающей вкрест основные разломы в земной коре, выполнено 3 раза: в 1971, 1972 и 1973 гг. По данным последнего нивелирования наблюдается опускание земной поверхности в Чуйской впадине на -15 ± 7 мм относительно района Сюеты (фундаментальный репер 5255). Южнее г. Фрунзе, в предгорной части, проявляется поднятие земной поверхности, достигающее в районе альплагеря «Аларча» $+22\pm 8$ мм.

ЛИНИЯ НИВЕЛИРОВАНИЯ 1-ГО КЛАССА ЗИДДЫ — ДУШАНБЕ — НУРЕК

Данная линия — одна из основных линий нивелирования 1-го класса на территории Душанбинского геодинамического полигона (протяженность более 150 км). Ее трасса пересекает Ходжа-Обигармский, Гиссаро-Кокшаальский, Илякский и другие крупные разломы в земной коре и проходит через ряд районов повышенной сейсмичности. Особо следует отметить, что в районе перевала Чормазак линия пересекает эпицентральною зону, где в 1943, 1956, 1957, 1966 г. произошли сильные землетрясения, и доходит до крупнейшего гидротехнического сооружения Средней Азии — Нурекской ГЭС. Учитывая эти особенности, линию закрепили на местности 65 нивелирными знаками, нивелирование выполнено в 1972, 1973 и 1974 гг.

Повышенные градиенты изменения высот нивелирных точек установлены в зонах пересечения нивелирной линией Гиссаро-Кокшаальского разлома (севернее Новабада) и разрывного нарушения в земной коре, проходящего через эпицентральною зону землетрясений в районе

перевала Чормазак, вблизи населенного пункта Тукмазор. Значения изменений высот нивелирных знаков в этих зонах во много раз превышают возможные ошибки их определения и достигают $30,7 \pm 1,5$ и $2,7 \pm 0,2$ мм/км.

ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КЫЗЫЛКУМЫ

Процесс активного трещинообразования на земной поверхности в Центральных Кызылкумах, начавшийся более 20 лет назад, продолжается до настоящего времени. Он существенно осложняет развитие градостроительства в одном из районов Узбекистана, имеющем важное народнохозяйственное значение. Поэтому начиная с 1968 г. в Центральных Кызылкумах проводятся специальные геодезические работы по изучению зон трещинообразования для получения количественных характеристик современных вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности.

В местах, где проявляются трещины на земной поверхности, вблизи районного центра Тамдыбулак и центральной усадьбы совхоза «40 лет Узбекистана», в урочище Тамдыкудук в 1968 г. были созданы геодезические площадки [3]. Повторные измерения (нивелирование 2-го класса и линейные измерения) выполнены в 1970 г.

Результаты анализа повторных измерений на площадке «Тамдыбулак» указывают, что наибольшие вертикальные перемещения земной поверхности за указанный период достигают $+6,8 \pm 3,2$ мм. При этом градиенты изменения превышений между грунтовыми реперами находятся в пределах от $+5,5 \pm 1,7$ до $+17,5 \pm 2,8$ мм/км.

В Тамдыкудукской зоне трещинообразования наибольшие относительные вертикальные перемещения достигают $13,6 \pm 3,5$ мм. Судя по характеру относительного изменения высот точек земной поверхности, можно предположить, что поверхность земли в этом районе претерпевает наклон с юга-востока на северо-запад.

В 1974 г. по указанию ГУГК был разработан и частично осуществлен новый проект геодезических работ в Центральных Кызылкумах. Основная цель этих работ — продолжение исследований современных движений земной поверхности в районах г. Зеравшана и поселков Тамдыбулака и Мурунтау, где под воздействием процесса трещинообразования разрушаются капитальные строения.

Работы 1974—1975 гг. послужат материалом не только для последующих исследований, но и позволят сейчас получить некоторое представление о характере современных движений.

На рис. 3 представлены графики относительных изменений высот нивелирных знаков по линиям, пересекающим вкрест основные разломы исследуемой территории. Они построены по данным нивелирования 1, 2 и 3-го классов, исполненного в этом районе в 1959—1974 гг.

Полученные нами по результатам нивелирования 2-го класса предварительные данные (рис. 3, график А) указывают, что земная поверхность в районе Тамдыкудука с 1968—1970 гг. по 1974 г. претерпела наклон с юго-востока на северо-запад. Наиболее интенсивные вертикальные движения земной поверхности проявляются в зоне Тамды-Карачатырского разлома, где градиент изменений высот равен $+2,1 \pm 0,6$ мм/км. При этом установлено относительное поднятие южной части приразломной территории над северной.

В районе пос. Тамдыбулак, по данным повторного нивелирования 1-го и 2-го классов 1974 г., проложенного по линиям нивелирования 2-го и 3-го классов 1968 и 1963 гг. (рис. 3, график Б), в зонах Тамды-Карачатырского, Северо-Тамдынского и Бесапан-Южноферганского разломов отмечены дифференцированные вертикальные движения земной поверхности с повышенными градиентами изменения высот. Наиболь-

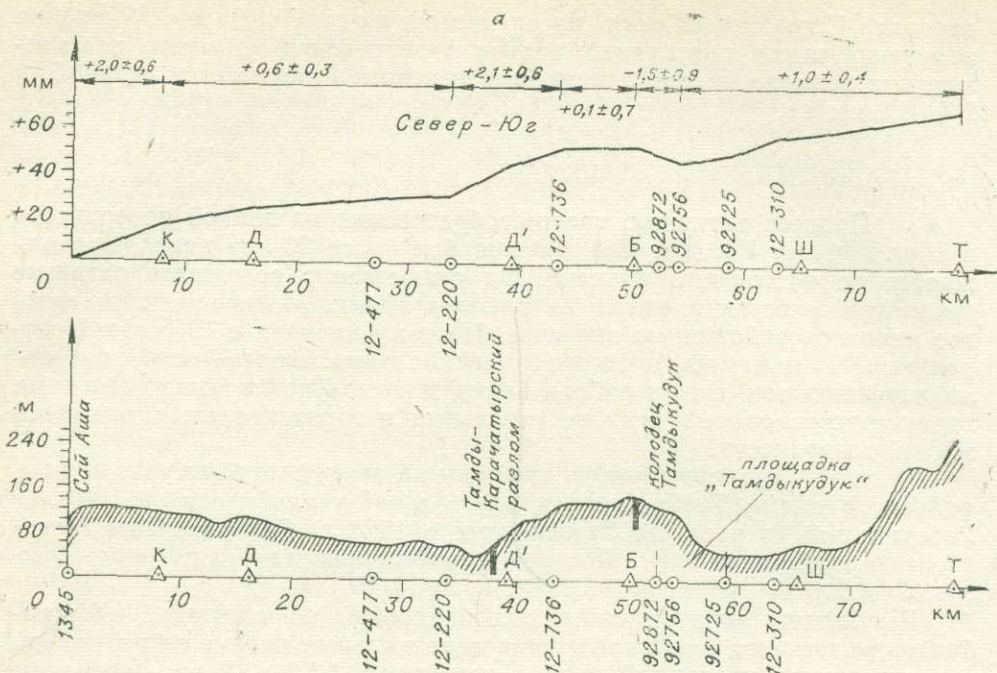


Рис. 3. Изменение высот нивелирных знаков; а — в районе Тамдыкудука (нивелирование 2-го класса, 1968—1970 и 1974 гг.), б — в районе Тамдыбулака (нивелирование 2-го и 3-го классов, 1959, 1962, 1963, 1968 и 1974 гг.).

1 — нивелирные знаки; 2 — изменения высот по данным нивелирования; 3 — градиенты изменения высот нивелирных знаков и возможные ошибки их определения, мм/км; 4 — топографический профиль вдоль линии нивелирования; 5 — разломы в земной коре.

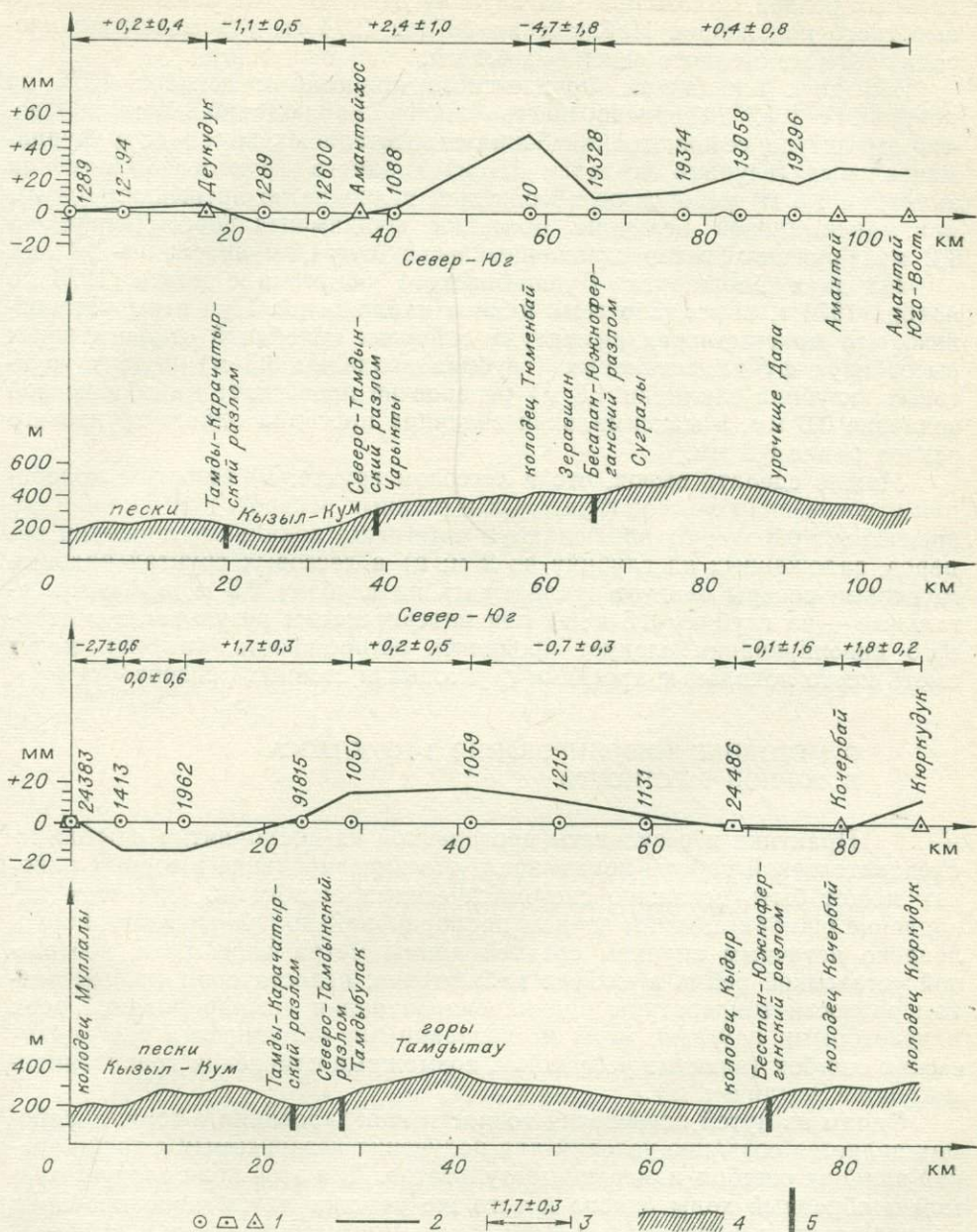
шее значение градиента, равное $-4,7 \pm 1,8$ мм/км, установлено в районе расположения г. Зеравшан. Не исключено, что процесс активного трещинообразования обусловлен расположением г. Зеравшан в зоне значительных градиентов изменения высот точек земной поверхности.

График В (рис. 3) характеризует вертикальные перемещения земной поверхности вдоль линии нивелирования субмеридионального направления, пересекающей вкrest перечисленные выше разрывные нарушения в земной коре и горы Тамдытау. Он построен по результатам нивелирования 1-го и 2-го классов 1974 г., 2-го и 3-го классов 1959 и 1962 гг. Повышенный градиент, равный $+1,7 \pm 0,3$ мм/км, отмечен в зоне соединения Тамды-Карачатырского и Северо-Тамдынского разломов, вблизи районного центра Тамдыбулак, где образование трещин на земной поверхности приводит к разрушениям различных сооружений.

Результаты повторного нивелирования в Центральных Кызылкумах указывают на относительное поднятие гор Тамдытау и вовлечение в этот процесс предгорных районов, где расположены г. Зеравшан, пос. Тамдыбулак и местность Чарыкты. Это поднятие ограничено Северо-Тамдынским и Беспан-Южноферганским глубинными разломами, тектонические движения по которым, по всей вероятности, являются первопричиной трещинообразования на поверхности земли.

О РЕЗУЛЬТАТАХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОПЫТНЫХ ПЛОЩАДКАХ

При исследовании современных тектонических движений нельзя не учитывать экзогенные факторы, которые могут вызвать изменения высот отдельных нивелирных знаков. Для наблюдения за поведе-



нием реперов в лессовом грунте на геодинамических полигонах созданы опытные площадки, на которых заложены реперы разного типа. Исходными реперами, относительно которых определяется изменение высотного положения других знаков, являются обсадные трубы геологических скважин, заложённые на глубину от 40 до 2450 м. В одном случае в качестве исходного принят скальный репер. Установлено, что на двух площадках, расположенных в г. Ташкенте, за период с марта 1971 по май 1972 г. сезонные относительные колебания высот из семи циклов наблюдений в большинстве случаев не превышают 0,5 мм. Однако выявлена и просадка некоторых реперов. Так, наибольшая просадка одного из ственных реперов достигает 1,4 мм; два грунтовых репера, за-

ложенные на глубину 2,0—2,3 м, просели на 2—3 мм. Два фундаментальных репера, заложенные на глубину 3,0—3,5 м, не изменили своего высотного положения. Наблюдения 1973 и 1974 гг. указывают на просадку того же стенного репера на 4,4 мм.

На двух площадках Фрунзенского полигона с декабря 1972 по ноябрь 1973 г. выполнено шесть циклов наблюдений. Установлено, что амплитуда сезонного колебания относительных высот двух фундаментальных (глубина закладки 3,5 м) и одного грунтового (глубина закладки 1,8 м) реперов по абсолютной величине не превышает 0,8 мм при максимальной величине просадки фундаментального репера на 1,2 мм. Грунтовой репер, заложенный на глубину 1,8 м, просел на 7,4 мм.

На двух площадках Душанбинского полигона с марта 1973 по ноябрь 1974 г. выполнено семь циклов наблюдений. При этом установлено, что максимальная амплитуда сезонных колебаний относительных высот двух фундаментальных (глубина закладки 3,5 м) и двух грунтовых (глубина закладки 1,8 м) реперов не превышает по абсолютной величине 0,6 мм, а максимальная величина просадки одного грунтового репера равна 0,9 мм.

Можно сделать вывод, что в лессовом грунте: а) сезонные колебания относительных высот грунтовых и стенных реперов, как правило, не превышают 0,8 мм; б) наблюдаются ощутимые локальные просадки реперов, заложенных на глубину до 2 м; в) в лессовых грунтах рядовые грунтовые реперы следует закладывать на глубину 2,5 м, а фундаментальные — на глубину 3,5 м; г) при интерпретации результатов повторного нивелирования следует проявлять осторожность, так как могут иметь место локальные просадки грунтовых и стенных реперов.

О МЕТОДИКЕ НИВЕЛИРОВАНИЯ 1-ГО КЛАССА В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

Практика и результаты проведенной на предприятии опытно-исследовательской работы показывают, что нивелирование в горных районах может быть искажено систематическими ошибками. При этом накопление ошибок с одним знаком пропорционально превышению и обусловлено неточным знанием средней длины метра пары реек, неотвесной установкой рейки в момент наблюдения, недостаточно точным учетом разности температуры при нивелировании и компарировании реек и некоторыми другими, мало исследованными источниками систематических ошибок (влияние рефракции, возможные изменения гравитационного поля Земли и т. д.).

Одним из путей повышения точности нивелирования в горных районах является создание условий для получения независимых с точки зрения влияния ошибок измерения результатов. Для этой цели следует прямой и обратный ходы одного и того же участка линии нивелирования прокладывать в разное время суток, разными инструментами и рейками, разными исполнителями. Особое внимание необходимо уделять установке реек в отвесное положение, для чего уровень при рейке следует верить во время работы ежедневно 4—6 раз, а рейки обязательно удерживать в отвесном положении с помощью специальных подпорок. В начале работ по нивелированию в горной местности каждый наблюдатель должен выполнить нивелирование по трассе между реперами с контрольным превышением. Величина контрольного превышения должна быть не менее 200 м и получена из многократного нивелирования. Сличение измеренного и контрольного превышения поможет определить готовность, с технической точки зрения, бригады к работе по нивелированию. Такие контрольные реперы заложены на Ташкентском, Фрунзенском и Душанбинском полигонах.

Научно-исследовательским учреждениям, занимающимся геодезическими исследованиями, следует отработать методику учета изменения длины метра инварных реек в период работы.

Кроме того, жизнь настоятельно требует совершенствования тригонометрического нивелирования, повышения точности этого метода, так как нивелирование 1-го и 2-го классов по горным трассам связано с большими трудностями, а подчас и невозможно.

Авторы выражают благодарность Г. Н. Кульвинскому, Р. М. Гумену и В. П. Шуркову, принимавшим активное участие в подготовке настоящей статьи.

С учетом накопленного опыта и результатов геодезических наблюдений в ГУГК при СМ СССР разрабатывается программа последующих повторных измерений на геодинимических полигонах. При этом повторные измерения будут в основном выполняться на локальных участках, где выявлены значительные градиенты изменения высот и плановые смещения пунктов триангуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Корешков Н. А.* Исследование современных движений земной коры геодезическими методами на геодинимических полигонах Средней Азии. Автореф. канд. дис. М., 1973.
2. *Корешков Н. А.* О состоянии геодезических работ на Ташкентском, Фрунзенском и Душанбинском геодинимических полигонах.— В кн.: Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. М., «Наука», 1974.
3. *Корешков Н. А., Райзман А. П.* Изучение современных движений земной коры геодезическими методами на Ташкентском геодинимическом полигоне и в Центральных Кызыл-Кумах.— В кн.: Изучение современных движений земной коры на стационарных геофизических полигонах. Ашхабад, 1970.

В. С. Передеро, П. А. Остропико, П. А. Атрушкевич

О МЕТОДИКЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ В СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ НА ЛОКАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ ПОЛИГОНА

Работы по изучению современных горизонтальных движений в Северном Тянь-Шане были начаты в 1973 г. с применением высокоточного светодаальномера СГ-3 с лазерным источником света.

Для горизонтальных наблюдений на Алма-Атинском геодинимическом полигоне использованы два геодезических четырехсторонника линейно-угловой сети, созданной в предыдущие годы. Оба четырехсторонника расположены в эпицентральной зоне Верненского (1887 г.) землетрясения.

В середине 1973 г. в эпицентральной зоне Чиликского (1889 г.) землетрясения была заложена линейная сеть — Алгабасский полигон, состоящая из 13 линий. Сеть представляет собой два четырехсторонника, наложенных друг на друга и опирающихся на одну общую сторону. Такая форма сети дает возможность определить горизонтальные движения любой направленности и в первую очередь вдоль Бескарагайского правостороннего сдвига амплитудой 6—7 м.

В 1974 г. Алгабасская сеть была расширена на север путем заложения двух трехсторонников, опирающихся на ту же общую сторону (рис. 1). После расширения сеть как бы связала воедино три крупные геологические структуры, расчлененные тектоническими разломами.

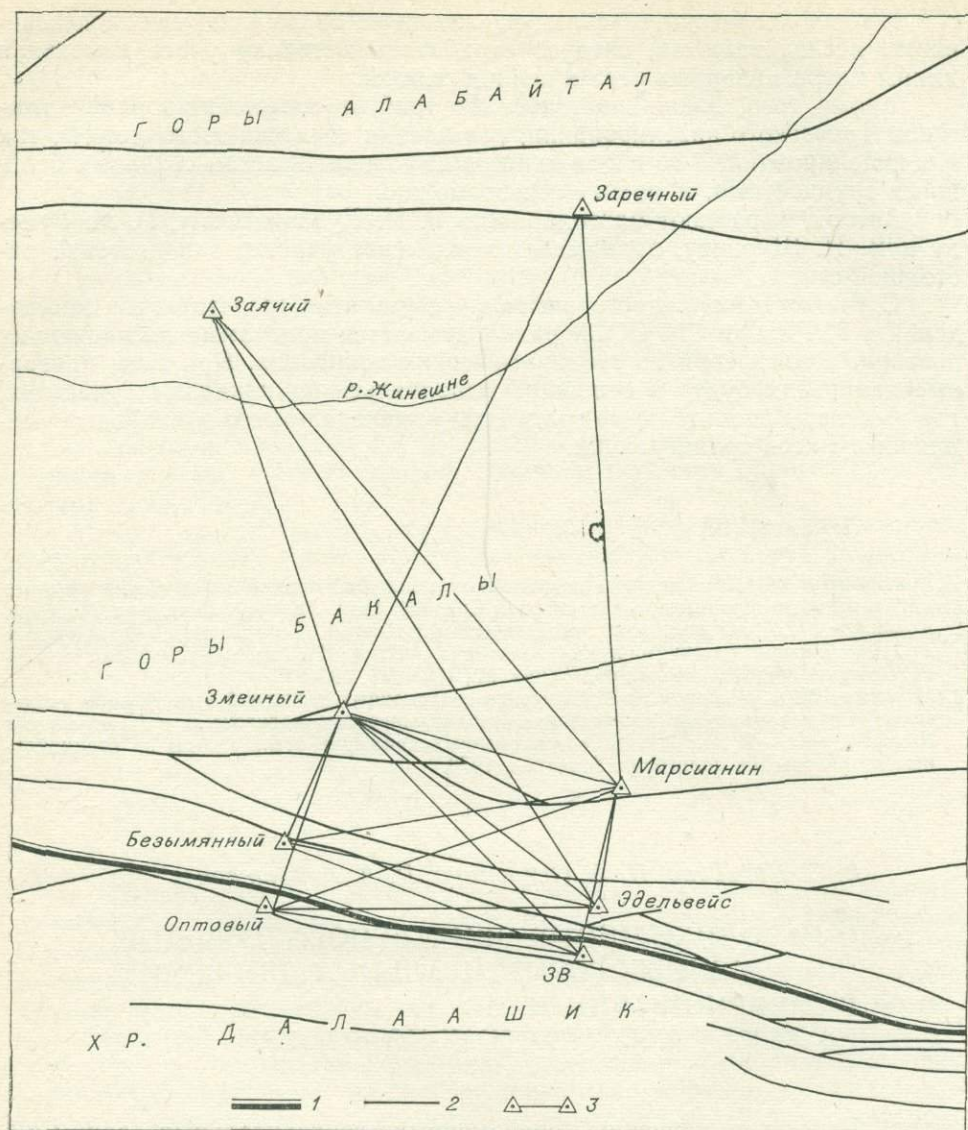
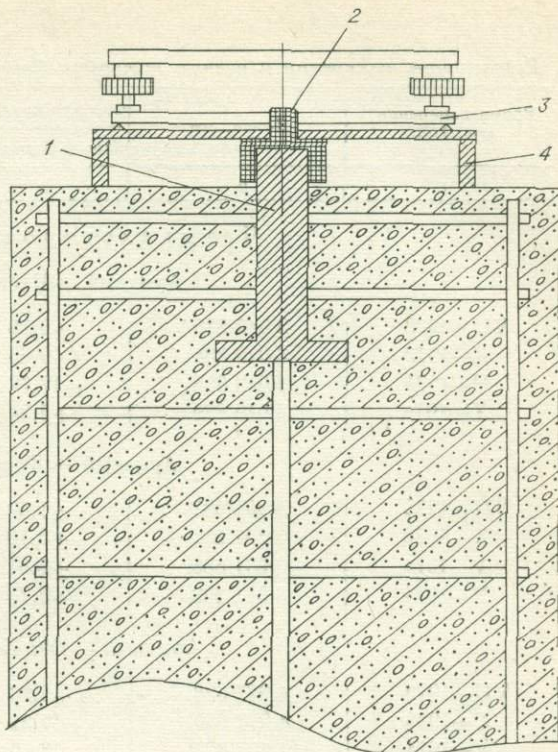


Рис. 1. Схема линейной сети Алгабасского геодинимического полигона.
1 — крупный Бескарагайский рельефообразующий разрыв; 2 — разрывы второго порядка; 3 — пункты и линии сети Алгабасского геодинимического полигона. М-б 1: 50 000.

Вершины линейной сети Алгабасского и Алма-Атинского геодинимических полигонов закреплены железобетонными тумбами. Для уменьшения ошибок за центрировку и редукцию приемопередатчика и отражателей на концах измеряемой линии разработано и применено приспособление для принудительного центрирования, состоящее из трех элементов: центра, закрепленного в тумбе, подставки и полого станого винта (рис. 2). При установке прибора на тумбу к его трегеру прикрепляется подставка с помощью станого винта, а затем прибор ставится на тумбу таким образом, что полый становой винт плотно садится на центр. Такое приспособление помимо уменьшения ошибки приведения в значительной степени сокращает время установки приборов на концах измеряемой линии. Каждый отражатель и приемопередатчик имеет индивидуальное приспособление для центрирования, и при уста-

Рис. 2. Схема принудительного центрирования приборов.

1 — центр из нержавеющей стали; 2 — бронзовый полый становой винт; 3 — трегер прибора или отражателя; 4 — специальная подставка.



новках приборов сохраняет- ся постоянно планового положения трегера относительно тумбы.

При выборе методики измерения были использо- ваны рекомендации и опыт наблюдений с применением светодальномеров типа СГ-3 и др. Учитывая сложность подъезда к отдельным пунк- там и громоздкость прибора, а также использованные рекомендации, измерения на линейных сетях проводи- лись в одну сторону в две видимости тремя сериями по десяти измерений в каждой. Метеорологические условия (температура и дав- ление) фиксировались на

концах измеряемой линии одновременно по сигналу оператора. Влаж- ность учитывалась только у приемопередатчика.

Точность измерения определялась по условию внутренней сходи- мости результатов по следующим формулам.

1. Средняя квадратическая ошибка одного измерения:

$$m_{\text{ср}} = \pm \sqrt{\frac{[\sigma\sigma]}{n-1}} \text{ (мм)}.$$

2. Средняя квадратическая ошибка измерения длины линии:

$$M_{\text{ср}} = \pm \frac{m_{\text{ср}}}{\sqrt{n}} \text{ (мм)}.$$

3. Относительная ошибка измерения длины линии:

$$\frac{M_{\text{ср}}}{D} \text{ (мм/км)},$$

где σ — отклонение от среднего; n — количество измерений; D — изме- ренная длина.

Для проверки прибора СГ-3 и сравнения измерений, полученных с его помощью, с результатами других электрооптических дальноте- ров в 1973 г. произведено контрольное измерение одной из линий ли- нейно-угловой сети Алма-Атинского геодинимического полигона, распо- ложенной в «спокойном поле» и измеренной ранее приборами «Геоди- метр» восьмой модели и двумя светодальномерами «Кварц». Результа- ты измерения этой линии свидетельствуют о правильности выбранной

Таблица 1

Результаты измерения и оценки точности длин линий Алма-Атинского полигона

Время измерения, мес, год	Длина, мм	Средняя квадратическая ошибка, мм		Относительная ошибка, мм/км
		одного измерения	измерения длины линии	
1	2	3	4	5

Четырехсторонник № 1

Арычный — Чапаева

VII—1973	3 049 833	$\pm 3,78$	$\pm 0,88$	0,16
X—1973	3 049 834	$\pm 9,63$	$\pm 1,25$	0,42
V—1974	3 049 835	$\pm 17,72$	$\pm 2,29$	0,76
X—1974	3 049 839	$\pm 3,34$	$\pm 0,43$	0,14

Арычный — Курсай

VII—1973	3 391 387	$\pm 1,60$	$\pm 0,42$	0,12
X—1973	3 391 387	$\pm 3,10$	$\pm 0,42$	0,12
V—1974	3 391 386	$\pm 8,81$	$\pm 1,14$	0,33
X—1974	3 391 382	$\pm 5,73$	$\pm 0,74$	0,22

Арычный — Ойджайляу

VII—1973	4 977 628	$\pm 2,23$	$\pm 0,53$	0,11
X—1973	4 977 629	$\pm 14,52$	$\pm 1,88$	0,38
V—1974	4 977 623	$\pm 3,10$	$\pm 0,40$	0,08
X—1974	4 977 639	$\pm 5,79$	$\pm 0,74$	0,15

Курсай — Чапаева

VII—1973	2 816 396	$\pm 1,82$	$\pm 0,43$	0,15
X—1973	2 816 399	$\pm 6,28$	$\pm 0,75$	0,30
V—1974	2 816 398	$\pm 2,27$	$\pm 0,29$	0,10
X—1974	2 816 402	$\pm 4,27$	$\pm 0,55$	0,20

Курсай — Ойджайляу

VII—1973	2 320 760	$\pm 3,12$	$\pm 0,72$	0,31
X—1973	2 320 757	$\pm 11,52$	$\pm 1,51$	0,66
V—1974	2 320 756	$\pm 1,69$	$\pm 0,22$	0,10
X—1974	2 320 765	$\pm 4,24$	$\pm 0,55$	0,24

Чапаева — Ойджайляу

VII—1973	2 686 452	$\pm 1,10$	$\pm 0,21$	0,06
X—1973	2 686 453	$\pm 1,52$	$\pm 0,23$	0,09
V—1974	2 686 462	$\pm 3,63$	$\pm 0,47$	0,18
X—1974	2 686 465	$\pm 3,00$	$\pm 0,39$	0,15

Четырехсторонник № 2

Горный Гигант — Лесхоз

IX—1973	3 417 288	$\pm 8,52$	$\pm 1,91$	0,56
V—1974	3 417 290	$\pm 2,53$	$\pm 0,57$	0,16
X—1974	3 417 285	$\pm 4,38$	$\pm 0,56$	0,15

Горный Гигант — Дачный

IX—1973	4 030 548	$\pm 8,12$	$\pm 1,81$	0,45
V—1974	4 030 564	$\pm 4,27$	$\pm 0,95$	0,24
X—1974	4 030 559	$\pm 4,95$	$\pm 0,64$	0,16

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Горный Гигант — Кок-Тюбе

IX—1973	3 581 335	$\pm 0,63$	$\pm 2,10$	0,59
V—1974	3 581 354	$\pm 2,10$	$\pm 0,47$	0,13
X—1974	3 581 337	$\pm 2,32$	$\pm 0,30$	0,08

Кок-Тюбе — Лесхоз

IX—1973	5 434 666	$\pm 3,12$	$\pm 0,74$	0,14
V—1974	5 434 677	$\pm 1,93$	$\pm 0,43$	0,08
X—1974	5 434 679	$\pm 6,04$	$\pm 0,78$	0,15

Кок-Тюбе — Дачный

IX—1973	3 981 925	$\pm 2,64$	$\pm 0,56$	0,14
V—1974	3 981 944	$\pm 4,35$	$\pm 0,97$	0,24
X—1974	3 981 938	$\pm 4,44$	$\pm 0,57$	0,15

Дачный — Лесхоз

IX—1973	2 562 239	$\pm 3,52$	$\pm 0,68$	0,27
V—1974	2 562 228	$\pm 4,68$	$\pm 1,05$	0,41
X—1974	2 562 251	$\pm 1,56$	$\pm 0,20$	0,08

нами методики исследований и достаточно высокой точности прибора СГ-3.

Дальномер	Длина, мм
«Кварц» № 1	5 424 058
«Кварц» № 2	5 424 056
«Геодиметр-8»	5 424 059
СГ-3	5 424 057

За изучаемый период на Алма-Атинском геодинамическом полигоне один из четырехсторонников измерен трижды, а другой — четырежды. Результаты этих измерений и оценка их точности приведены в табл. 1. Анализируя данные этой таблицы, можно сделать вывод, что здесь не произошло горизонтальных движений, превышающих ошибки измерений.

На Алгабасском полигоне произведены шестикратные повторные измерения, за исключением четырех сторон, измеренных трижды. Результаты измерения и оценки их точности приведены в табл. 2. Можно предположительно говорить, что изменение для отдельных линий сети вызвано процессами подготовки и разрядки напряжений во время землетрясения 12 февраля 1975 г. ($M=5,2$), эпицентр которого расположен в 30 км на северо-восток от полигона. Однако это предположение требует дальнейшей проверки.

Задача изучения современных горизонтальных движений земной коры не может быть решена в полной мере на локальных разобщенных сетях. Для этой цели необходимо создание протяженных сетей, охватывающих целые подвижные зоны или часть их. Такие сети нам представляются в виде нескольких параллельных линий, ориентированных вкрест простирания основных геологических структур. При обнаружении интенсивных горизонтальных движений последние могут быть изучены простейшими локальными сетями типа рассмотренных нами.

Таблица 2

Результаты измерения и оценки точности длин линий Алгабасского полигона

Время измерения, мес, год	Длина, мм	Средняя квадратическая ошибка, мм		Относительная ошибка, мм/км
		одного измерения	измерения длины линии	
1	2	3	4	5
Змеинный — Марсианин				
IX—1973	2 386 044	$\pm 1,68$	$\pm 0,39$	0,16
X—1973	2 386 044	$\pm 3,08$	$\pm 0,39$	0,16
IV—1974	2 386 045	$\pm 2,49$	$\pm 0,32$	0,13
VII—1974	2 386 044	$\pm 1,21$	$\pm 0,16$	0,10
IX—1974	2 386 046	$\pm 2,54$	$\pm 0,33$	0,14
IV—1975	2 386 051	$\pm 2,79$	$\pm 0,36$	0,15
Змеинный — Безымянный				
IX—1973	1 836 457	$\pm 3,57$	$\pm 0,76$	0,42
X—1973	1 836 457	$\pm 11,08$	$\pm 1,36$	0,75
IV—1974	1 836 459	$\pm 10,02$	$\pm 1,29$	0,72
VII—1974	1 836 458	$\pm 2,55$	$\pm 0,33$	0,18
IX—1974	1 836 465	$\pm 5,15$	$\pm 0,66$	0,36
IV—1975	1 836 463	$\pm 6,76$	$\pm 0,87$	0,47
Змеинный — Оптовый				
IX—1973	2 020 571	$\pm 4,78$	$\pm 1,08$	0,54
X—1973	2 020 564	$\pm 10,70$	$\pm 1,36$	0,68
IV—1974	2 020 567	$\pm 12,24$	$\pm 1,58$	0,79
VII—1974	2 020 572	$\pm 6,87$	$\pm 0,89$	0,45
IX—1974	2 020 568	$\pm 2,19$	$\pm 0,28$	0,14
IV—1975	2 020 572	$\pm 3,59$	$\pm 0,46$	0,23
Змеинный — Эдельвейс				
IX—1973	2 592 200	$\pm 3,76$	$\pm 0,78$	0,30
X—1973	2 592 183	$\pm 4,57$	$\pm 0,58$	0,22
IV—1974	2 592 196	$\pm 7,66$	$\pm 0,99$	0,38
VII—1974	2 592 194	$\pm 2,67$	$\pm 0,34$	0,13
IX—1974	2 592 196	$\pm 1,97$	$\pm 0,25$	0,10
IV—1975	2 592 197	$\pm 5,86$	$\pm 0,76$	0,29
Змеинный — Заячий				
VII—1974	3 859 376	$\pm 6,30$	$\pm 0,81$	0,21
IX—1974	3 859 379	$\pm 3,74$	$\pm 0,48$	0,13
IV—1975	3 859 382	$\pm 3,05$	$\pm 0,56$	0,14
Змеинный — 3-В				
IX—1973	2 646 633	$\pm 8,10$	$\pm 1,77$	0,67
X—1973	2 646 627	$\pm 6,70$	$\pm 0,88$	0,33
IV—1974	2 646 631	$\pm 9,41$	$\pm 1,22$	0,46
VII—1974	2 646 633	$\pm 2,87$	$\pm 0,37$	0,14
IX—1974	2 646 628	$\pm 2,82$	$\pm 0,36$	0,14
IV—1975	2 646 636	$\pm 5,70$	$\pm 0,73$	0,28
Змеинный — Заречный				
VII—1974	3 981 749	$\pm 2,79$	$\pm 0,36$	0,09
IX—1974	3 981 746	$\pm 4,02$	$\pm 0,52$	0,13
IV—1975	3 981 748	$\pm 8,17$	$\pm 1,05$	0,26
Марсианин — Безымянный				
IX—1973	2 547 648	10,08	$\pm 2,26$	0,89
X—1973	2 547 637	$\pm 5,10$	$\pm 0,70$	0,28

1	2	3	4	5
IV—1974	2 547 645	$\pm 7,99$	$\pm 1,03$	0,40
VII—1974	2 547 656	$\pm 4,54$	$\pm 0,59$	0,23
IX—1974	2 547 643	$\pm 3,34$	$\pm 0,43$	0,17
IV—1975	655	$\pm 5,21$	$\pm 0,67$	0,26
Марсианин — Оптовый				
IX—1973	2 724 163	$\pm 7,20$	$\pm 1,57$	0,28
X—1973	2 724 163	$\pm 8,18$	$\pm 1,08$	0,40
IV—1974	2 724 169	$\pm 6,88$	$\pm 0,89$	0,33
VII—1974	2 724 178	$\pm 5,51$	$\pm 0,71$	0,26
IX—1974	2 724 172	$\pm 4,80$	$\pm 0,62$	0,23
IV—1975	2 724 177	$\pm 3,68$	$\pm 0,48$	0,18
Марсианин — Эдельвейс				
IX—1973	1 647 912	$\pm 17,57$	$\pm 3,96$	2,40
X—1973	1 647 912	$\pm 7,40$	$\pm 1,00$	0,61
IV—1974	1 647 915	$\pm 9,62$	$\pm 1,24$	0,76
VII—1974	1 647 919	$\pm 3,02$	$\pm 0,39$	0,24
IX—1974	1 647 922	$\pm 5,35$	$\pm 0,69$	0,42
IV—1975	1 647 911	$\pm 6,57$	$\pm 0,85$	0,52
Марсианин — Заячий				
VII—1974	5 521 664	$\pm 8,88$	$\pm 1,14$	0,21
IX—1974	5 521 666	$\pm 13,13$	$\pm 1,70$	0,31
IV—1975	5 521 669	$\pm 6,59$	$\pm 0,85$	0,15
Марсианин — 3-В				
IX—1973	1 745 815	$\pm 12,10$	$\pm 2,68$	1,53
X—1973	1 745 811	$\pm 10,76$	$\pm 1,37$	0,79
IV—1974	1 745 810	$\pm 11,68$	$\pm 1,51$	0,86
VII—1974	1 745 807	$\pm 2,27$	$\pm 0,29$	0,17
IX—1974	1 745 817	$\pm 6,79$	$\pm 0,88$	0,51
IV—1975	1 745 815	$\pm 2,10$	$\pm 0,27$	0,15
Марсианин — Заречный				
VII—1974	4 674 784	$\pm 6,75$	$\pm 0,87$	0,19
IX—1974	4 674 787	$\pm 4,84$	$\pm 0,62$	0,13
IV—1975	4 674 783	$\pm 6,87$	$\pm 0,89$	0,19
Эдельвейс — Безымянный				
IX—1973	1 499 506	$\pm 4,06$	$\pm 1,06$	0,71
X—1973	1 499 510	$\pm 2,00$	$\pm 0,31$	0,22
IV—1974	1 499 507	$\pm 3,82$	$\pm 0,49$	0,32
VII—1974	1 499 511	$\pm 4,34$	$\pm 0,57$	0,38
IX—1974	1 499 510	$\pm 2,52$	$\pm 0,33$	0,22
IV—1975	1 499 503	$\pm 8,51$	$\pm 1,10$	0,73
Эдельвейс — Оптовый				
IX—1973	1 594 633	$\pm 5,18$	$\pm 1,22$	0,77
X—1973	1 594 632	$\pm 2,79$	$\pm 0,38$	0,24
IV—1974	1 594 630	$\pm 3,56$	$\pm 0,46$	0,29
VII—1974	1 594 633	$\pm 4,27$	$\pm 0,55$	0,34
IX—1974	1 594 635	$\pm 3,44$	$\pm 0,44$	0,27
IV—1975	1 594 639	$\pm 5,02$	$\pm 0,65$	0,41

1	2	3	4	5
3-B — Безымянный				
IX—1973	1 468 008	$\pm 4,89$	$\pm 1,08$	0,73
X—1973	1 468 002	$\pm 2,62$	$\pm 0,39$	0,27
IV—1974	1 468 006	$\pm 3,60$	$\pm 0,46$	0,31
VII—1974	1 468 001	$\pm 2,40$	$\pm 0,31$	0,21
IX—1974	1 468 006	$\pm 2,46$	$\pm 0,32$	0,22
IV—1975	1 468 019	$\pm 7,96$	$\pm 1,03$	0,70
3-B — Оптовый				
IX—1973	1 549 418	$\pm 4,12$	$\pm 0,89$	0,58
X—1973	1 549 419	$\pm 5,00$	$\pm 0,65$	0,42
IV—1974	1 549 415	$\pm 2,40$	$\pm 0,31$	0,20
VII—1974	1 549 419	$\pm 2,29$	$\pm 0,30$	0,20
IX—1974	1 549 418	$\pm 2,52$	$\pm 0,32$	0,21
IV—1975	1 549 422	$\pm 4,33$	$\pm 0,56$	0,36

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленников А. С., Одинов Н. Н., Хомаза В. Ф., Энман В. Б. Опыт высокоточных светодальномерных измерений в горах.— «Геодезия и картография», 1971, № 2.
2. Наумов Я. В. Применение методов и средств геодезии для изучения СДЗ поверхности.— В кн.: Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. М., «Наука», 1974.
3. Широв Ф. В., Егоров Г. В., Хомаза В. Ф. Об оценке точности измерений светодальномером коротких расстояний.— «Геодезия и картография», 1970, № 6.

П. А. Остропики, Э. М. Антоненко, П. А. Атрушкевич

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ПРИАЛМААТИНСКОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ РАЙОНЕ

Приалмаатинский сейсмический район, охватывающий площадь от гор Кандыктас на западе до р. Чилик на востоке, от хр. Кунгей Алатау на юге до южных подножий хр. Джунгарский Алатау на севере, характеризуется сложным геологическим строением, обусловленным широким развитием метаморфических комплексов пород докембрия и нижнего палеозоя, обилием разновозрастных магматических пород, неоднократно и интенсивно проявившимися тектоническими процессами. Наибольшее значение для района имеют геологические процессы, связанные с эпохой альпийской активизации, особенно с неотектоническим этапом. Новейшая тектоника, создавшая современный рельеф Тянь-Шаня, проявилась главным образом дизъюнктивными нарушениями: расколами земной коры и дифференцированными перемещениями блоков по разломам. Наряду с глубинными разломами с амплитудами перемещений 2000—3000 м и более здесь широко представлены разломы с амплитудами 500—1000 м, а также более мелкие. К глубинным относятся Заилийский разлом в горной части северного склона хр. Заилийский Алатау и Алма-Атинский разлом, отделяющий Илийскую впадину от Заилийского Алатау; другие разломы хорошо выражены четкими тектоническими уступами в современном рельефе Заилийского Алатау [11].

Сейсмическую опасность Приалмаатинского района обычно связывают с интенсивностью контрастных разнонаправленных тектонических деформаций и длительностью развития разломов земной коры. Считается, что изучение современных тектонических движений на таких разломах дает ценный материал для поисков предвестников землетрясений и сейсморайонирования.

Следует учитывать, что каждый отдельный шов глубинного разлома представляет лишь фрагмент общей картины деформации земной коры сейсмического района. Научно обоснованный анализ полной картины деформации возможен лишь в том случае, когда изучается не отдельный разлом, а весь подвижный пояс [1]. Идеальное решение этой задачи можно получить путем организации на таком подвижном поясе регионального геодинамического полигона и проведения на нем повторных измерений с требуемой частотой.

Практика показывает, что на таких крупных полигонах лишь один опрос высотной сети занимает два — три года и, следовательно, только через четыре — пять лет можно получить сравнительные материалы исследований [13]. Такой полигон, как правило, покрывается нивелировкой разного класса точности. Из сказанного следует, что установить с его помощью детальную картину деформаций земной поверхности в сейсмоактивном районе нельзя.

В этой связи, вероятно, может представлять интерес организация в пределах регионального геодинамического полигона геодезических исследований на двух-трех протяженных профилях вкрест простирания основных сейсмогенных зон, дополненная изучением наиболее мобильных участков на отдельных сейсмогенных разрывах. При совместной интерпретации результатов исследований на региональном полигоне и 4-, 6-кратных повторных наблюдений в год сети микрополигонов, можно рассчитывать на успешное изучение закономерностей современных тектонических движений земной коры сейсмоактивного района.

В настоящей статье рассматривается вопрос о создании такой сети микрополигонов в районе Алма-Атинского регионального [13] и малого [2] геодинамических полигонов для определения степени сейсмической опасности Приалмаатинского района.

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ПОСТРОЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

На геологической основе, дополненной элементами новейшей тектоники и сейсмодислокаций, распределением эпицентров крупнейших землетрясений прошлого и проявлением современной сейсмичности, нами проведен целенаправленный выбор площадей для создания геодезических сетей с целью изучения современных движений земной поверхности в различных геолого-тектонических условиях.

В пределах Приалмаатинского сейсмического района выделено четыре таких участка, на трех из которых заложены нивелирные профили (Алма-Атинский, Бартогайский, Алгабасский). Кроме того, использован Талгарский полигон Института физики Земли АН СССР. Нивелирные профили жестко закреплены на поверхности реперами. Помимо высотной сети, на Алгабасском полигоне создана специальная линейная сеть для высокоточных измерений горизонтальных деформаций земной поверхности с помощью лазерного светодаляномера. На Алма-Атинском геодинамическом полигоне для этой цели использована линейно-угловая сеть ГУГКа. Все геодезические построения ориентированы в

субмеридиональном направлении, вкрест простираения преобладающих тектонических нарушений района.

На Алма-Атинском геодинамическом полигоне, основанном в 1967 г. [2], нивелирный профиль начинается на Боролдайском поднятии и, следуя вдоль русла р. Бол. Алма-Атинки до ее коленчатого изгиба, пересекает почти вкрест простираения основную сейсмогенную систему разрывных нарушений, в том числе Заилийский и Алма-Атинский разломы и эпицентральной зону Верненского землетрясения 1887 г. Общая протяженность трассы 37 км. Она закреплена 34 реперами, среди которых 7 фундаментальных, 23 грунтовых, 1 глубинный, 2 скальных и 1 стенной.

На Талгарском полигоне, расположенном в 25 км к востоку от Алма-Атинского, нивелирный профиль следует от южной окраины г. Талгар до слияния рек Правый Талгар и Левый Талгар. Он имеет длину около 8 км и закреплён на местности 15 грунтовыми и 3 скальными реперами. В настоящее время этот профиль продлен на 3 км вверх по Левому Талгару, где пересекает Заилийский глубинный разлом.

Алма-Атинский и Талгарский полигоны охватывают территории с различными геолого-тектоническими условиями. На севере это — предгорная равнина с мощным рыхлым кайнозойским чехлом, на юге — комплекс пород палеозойского основания. Учитывается, что наблюдения на этих полигонах проводятся в районе интенсивной застройки, поэтому не исключается влияние техногенных факторов на поведение реперов.

Алгабасский полигон находится в восточной части Приалмаатинского сейсмического района на северо-восточной оконечности хр. Далаашик, вблизи эпицентра катастрофического Чиликского землетрясения 1889 г. Он охватывает участок между Бескарагайским и Северо-Далаашикским разломами.

Особый интерес представляет Бескарагайский разлом, прослеживаемый от коленчатого изгиба р. Чилик (эпицентра Чиликского землетрясения 1889 г.) на запад-северо-запад до р. Женешке, где обрывается Северо-Далаашикским разломом. По Бескарагайскому разлому контактируют вулканогенно-осадочные образования кембрия и терригенная толща среднего — верхнего визе. Контакт открытый и лишь местами прикрыт маломощным чехлом (1—3 м) делювиально-пролювиальных отложений современных конусов выноса.

Бескарагайский разлом и сопровождающая его группа мелких разрывов относятся к молодым, активным в настоящее время. Серия нивелирных профилей пересекает названную группу разрывов в трех местах. Общая длина нивелирных трасс составляет 900 м и закреплена на местности 18 скальными реперами. Сложные геодезические построения линейной сети, в состав которых входят 17 измеряемых линий при длинах от 1500 до 5500 м, на севере доведены до Северо-Далаашикского разлома. Таким образом, на Алгабасском геодинамическом полигоне установлен достаточно надежный контроль за поведением трех тектонических блоков, разделенных двумя крупными разломами. В отличие от первых двух Алгабасский полигон находится в слабо населенном районе, реперы заложены в коренных породах, что обуславливает большую надежность геодезических наблюдений.

Четвертый полигон Приалмаатинского сейсмического района находится в северной части урочища Бартогай на левом берегу р. Чилик. Нивелирный профиль длиной 1,5 км, закреплённый 26 реперами, из которых 20 скальных и 6 грунтовых, заложен с целью наблюдений за дислокациями вдоль зоны Бартогайского разлома. Профиль начинается в забое 160-метровой штольни, пройденной в коренных породах палеозоя, и следует на юго-восток в урочище Бартогай, пересекая зону главного разлома.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРИБОРЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Современные вертикальные движения земной поверхности на рассматриваемых полигонах выявлялись методом повторного нивелирования по усовершенствованной методике 1-го класса с помощью нивелира *Koni-007* и комплекта инварных двухшкаловых реек фирмы «Цейс». Для изучения горизонтальной составляющей современных движений земной поверхности был использован метод непосредственных измерений длин линий с помощью прецизионного геодезического светодальномера СГ-3 отечественного производства.

В течение всего периода исследований контролировались оптимальные параметры приборов и инструментов согласно инструкциям [9, 10]. В превышения, измеренные по секциям нивелирных профилей, вводилась поправка за среднюю длину метра комплекта реек по результатам эталонирования их на компараторе. Кроме того, в эти превышения вводилась поправка за различие температуры реек при эталонировании на компараторе (всегда 20°C) и нивелировании.

Качество нивелирования оценивалось средней квадратической случайной ошибкой среднего превышения на километр хода по разностям превышений, определенных из измерений в прямом и обратном направлениях между двумя смежными реперами. Эта ошибка, рассчитанная по известным формулам, составила на Алма-Атинском полигоне $\pm 0,36$ мм/км, Талгарском — $\pm 0,40$, Алгабасском — $\pm 0,40$, Бартогайском — $\pm 0,33$ мм/км, что свидетельствует о высокой точности работ [9], а следовательно, и о надежности выводов, вытекающих из экспериментальных геодезических данных.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены графики движения реперов рассматриваемых полигонов во времени относительно первого репера, считая от северного конца профиля, условно принятого за неподвижный на протяжении всего периода исследований. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат — изменение высоты рассматриваемого репера относительно исходного. Анализ вертикальных движений земной поверхности на Алма-Атинском геодинамическом полигоне показывает, что все реперы за период с 1967 г. до летней нивелировки 1969 г. испытали интенсивное поднятие относительно репера 656, расположенного на Боролдайской горстовой ступени. За это время высотное положение каждого репера Больше-Алмаатинской нивелирной трассы изменялось почти линейно, т. е. с постоянной скоростью. Однако величина этой скорости зависела от местоположения репера. Так, реперы, расположенные севернее Алма-Атинского разлома, испытывали восходящее движение со скоростью не более 6 мм/год, в то время как реперы, находящиеся на его южном крыле в непосредственной близости от разлома, имеют скорость поднятия +11 мм/год. По мере продвижения на юг от разлома скорость реперов возрастает, репер IVBX, расположенный на нижней предгорной ступени, воздымался со скоростью +35 мм/год на протяжении 22 месяцев. Таким образом, тектонические блоки на северном борту Заилийского Алатау за период с 1967 г. до августа 1969 г. имели восходящее дифференцированные движения, а глубинный Алма-Атинский разлом выступал в роли шарнира.

Повторное нивелирование в конце мая 1970 г. показало, что с августа 1969 г. реперы практически не изменили своего высотного положения. Очередное измерение в июле 1970 г. выявило, что реперы вы-

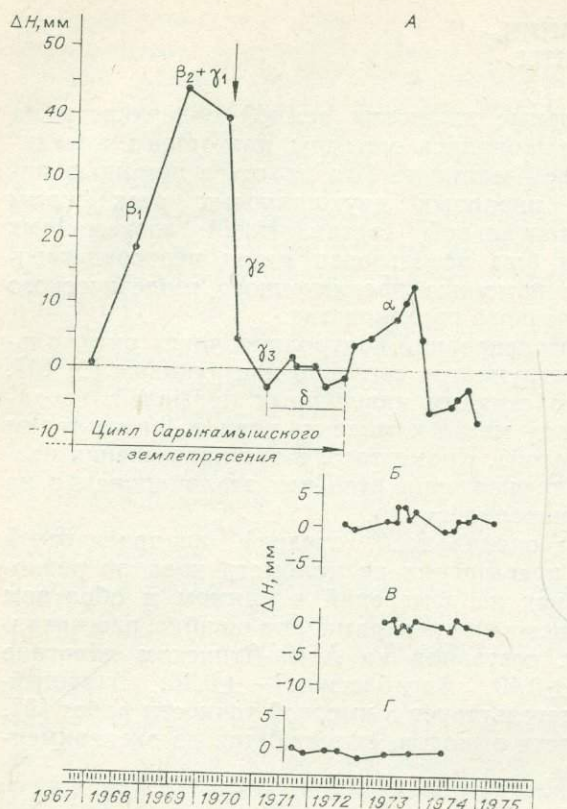


Рис. 1. Современные вертикальные движения земной поверхности на полигоне Приалмаатинского сейсмического района.

А — фундаментальный репер 130, Алма-Ата, Б — репер 6 на профиле Алгабас, В — репер 24, Бартогай, Г — репер 512, Талгар.

Стрелкой отмечен момент основного толчка Сарыкамышского землетрясения.

сотной сети опустились скачкообразно. При этом оказалось, что репер IVBX опустился на 60 мм, тогда как у оси шарнира понижение не превысило 4 мм. Повторной нивелировкой в декабре 1970 г. установлено, что реперы продолжали опускаться. В марте 1971 г. опускание земной поверхности на полигоне прекратилось. Многократные повторные нивелировки той же трассы на протяжении 1971—1975 гг. показывают, что движения земной поверхности на полигоне имеют колебательный характер с заметной тенденцией поступательного векового движения.

Столь значительные контрастные вертикальные движения объяснить случайными ошибками нивелирования и нестабильностью реперов нельзя. Скорее всего здесь мы имеем дело с медленными и импульсивными (сейсмическими) движениями.

Для подтверждения подобного предположения обратимся к рис. 2, на котором представлена типичная картина современных вертикальных движений земной коры в сейсмических областях для одного цикла сильного землетрясения. Намеченные здесь семь фаз вертикальных деформаций земной коры были установлены для многих землетрясений в различных геолого-тектонических условиях учеными разных стран: Ю. А. Мещеряковым [12], Ю. Д. Буланже и др. [15], Ленzenом [19], Шольцем [23], Фузии [17, 18] и др. Обобщенный образ разных стадий деформаций земной коры, представленный на рис. 2, можно считать теоретической моделью вертикальных движений в сейсмической области.

Сравнение наблюдаемых нами современных вертикальных движений земной поверхности на Алма-Атинском геодинамическом полигоне (см. рис. 1) с их теоретической моделью для сейсмической области (см. рис. 2) убедительно свидетельствует об идентичности картин. Объединение на рис. 1 фаз β_2 и γ_1 в одну неразделенную фазу, по-видимому, не имеет принципиального значения, а вызвано дискретностью наших наблюдений. Отсутствие на рис. 1 вековой фазы движений α вызвано отсутствием наблюдений до 1967 г.

Таким образом, нам представляется правомерным предположение о том, что деформация земной поверхности на Алма-Атинском геодинамическом полигоне непосредственно связана с циклом сильного Сарыкамышского землетрясения ($M=6,8$), которое произошло в Приалмаатинском сейсмическом районе 5 июня 1970 г. в 160 км от поли-

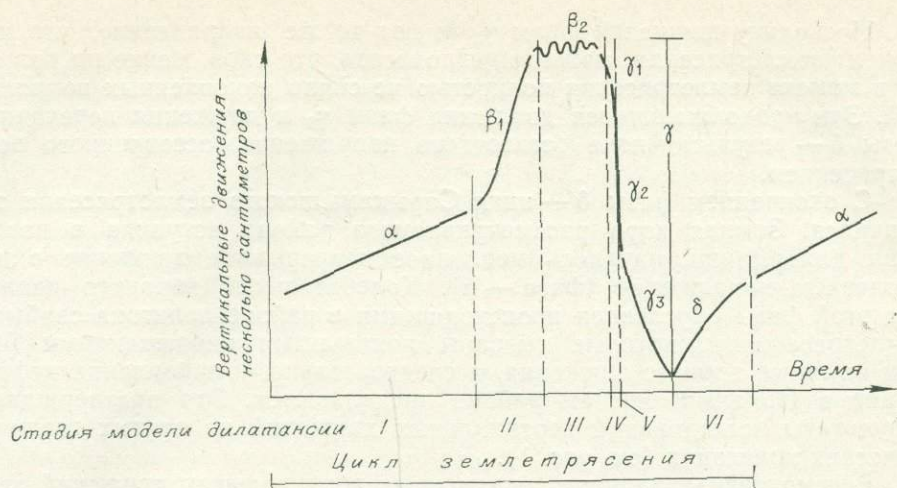


Рис. 2. Типичная качественная картина вертикальных современных движений земной коры в сейсмических районах.

Распознанные фазы цикла землетрясения: α — медленное непрерывное движение с постоянной скоростью, упругое состояние; β_1 — более быстрое движение за несколько лет вперед перед сильным землетрясением; β_2 — неустойчивое состояние в виде пульсирующей деформации за несколько месяцев перед сильным землетрясением; γ_1 — движение непосредственно перед главным толчком; γ_2 — импульсивное движение в момент главного толчка; γ_3 — быстрое движение после землетрясения от недель до месяцев; δ — переходное состояние.

Стадии модели дилатансии как физической основы предсказания землетрясения: I — формирование упругих напряжений; II — процесс собственно дилатансии; III — преобладает приток жидкости в расширенный район; IV — восстановление порового давления; V — главный толчок и резкое падение напряжений; VI — афтершоки.

гона и ощущалось на нем силой в 5 баллов [3, 8]. В этой связи вертикальные движения земной поверхности, представленные на рис. 1, заключают в себе значительную информацию о предстоящей сейсмической опасности. К сожалению, из-за отсутствия фазы α нельзя определить момент наступления фазы β_1 . Сам факт наступления фазы β_1 свидетельствует о начале необратимого процесса непосредственной подготовки землетрясения [22].

Процесс деформации земной коры, представленный фазами β_1 и β_2 , характеризуется тем, что для более сильной сейсмической катастрофы время продолжительности этих фаз длиннее. Установлено [16, 17, 22], что логарифм продолжительности (τ) предваряющего эффекта для более чем 30 землетрясений связан следующей зависимостью:

$$\lg \tau (\text{год}) = 0,5 M - 3,$$

где M — магнитуда землетрясения. Оценка временной продолжительности эффектов в течение фаз β_1 и β_2 цикла землетрясения, видимо, даст возможность предсказать магнитуду готовящегося землетрясения. Так, например, если принять за начало фазы β_1 декабрь 1967 г., в августе 1969 г. можно было предполагать, исходя из приведенной формулы, что в районе исследований накопились напряжения, способные генерировать землетрясение с $M=6$, а в мае 1970 г. — с $M=6,8$.

Так как длительность фазы β_2 не превышает нескольких месяцев, то, зная момент ее наступления, можно приблизительно судить о времени наступления землетрясения.

Неменьший интерес представляют и последующие фазы вертикальных смещений на рис. 1. Так, фаза γ_2 , которая характеризуется быстрыми импульсивными смещениями на земной поверхности, соответствует моменту, когда происходит сейсмическое скольжение по разрыву в очаге. Согласно теории упругой отдачи Рейда [21], движения этой фазы всегда противоположны движениям вековой фазы α .

Поскольку движения фазы γ_3 имеют то же направление, что и в момент землетрясения, можно предполагать, что скольжение по разрыву в момент землетрясения полностью не сняло накопленных напряжений. Эти продолжающиеся движения фазы γ_3 и движения переходной фазы δ — результат поля остаточного напряжения, оставленного землетрясением.

С окончанием фазы δ — цикл Сарыкамышского землетрясения закончился. Земная кора рассматриваемого района вступила в новый цикл деформации, началось медленное непрерывное движение с накоплением напряжений (фаза — α). Колебательный характер движения этой фазы обусловлен происходящими в районе полигона слабыми землетрясениями, которые вызваны локальными напряжениями [4]. Тем не менее процесс движения, а следовательно, и накопления деформаций в Приалмаатинском районе продолжается. Это подтверждают результаты исследований вертикальных движений на других геодинамических полигонах (см. рис. 1).

Рассмотренная картина современных вертикальных движений земной поверхности на Алма-Атинском геодинамическом полигоне может быть истолкована как с позиций теории упругой отдачи [21, 23], так и с помощью модели дилатансии [14, 20, 22], фазы которой показаны на рис. 2. В обоих случаях такие движения могут быть вызваны развитием надвиговых структур Северо-Тяньшаньского орогенного пояса в результате действия субмеридионального сжатия, т. е. Сарыкамышское землетрясение можно рассматривать как результат фрикционных взаимодействий на границе сходящихся блоков земной коры Северного Тянь-Шаня.

Можно предположить, что зона подготовки Сарыкамышского землетрясения в северо-западном направлении от эпицентра простиралась более чем на 160 км, что подтверждается также сейсмологическими наблюдениями [5].

Предложенное нами объяснение природы вертикальных движений земной поверхности на Алма-Атинском геодинамическом полигоне согласуется с геологическими исследованиями [7], в результате которых установлено, что Сарыкамышское землетрясение обусловлено надвигом в направлении с юга на север. Оно не противоречит также утверждению, что преобладающими движениями при землетрясении в Средней Азии являются горизонтальные неравномерные сжатия, преимущественно перпендикулярные к основным структурам [6].

Проведенный выше расчет магнитуды возможного землетрясения по данным повторного нивелирования, дополненный сведениями о сейсмическом режиме очаговой зоны Сарыкамышского землетрясения 1967 г., когда отмечался довольно высокий уровень сейсмичности, а на протяжении двух последующих лет землетрясений не было, позволяет предположить, что необратимый процесс (начало фазы β_1 , или стадии II) непосредственной подготовки землетрясения с $M=6,8$ в Приалмаатинском сейсмическом районе не превышает трех лет.

ВЫВОДЫ

1. На примере сильного Сарыкамышского землетрясения получены количественные данные, свидетельствующие о циклической природе современных движений земной коры в сейсмоактивном районе.

2. Следует предположить, что информация об аномальном поле современных вертикальных движений земной поверхности, обусловленном эндогенными причинами, является достаточно представительным прогностическим признаком.

1. Ажгирей Г. Д. О некоторых важных закономерностях тектонического строения и движения земной коры.— «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1960, № 8.
2. Атрушкевич П. А. Алма-Атинский полигон по изучению современных движений земной коры.— В кн.: Геология. Вып. V. Алма-Ата, Изд-во МВи ССО КазССР, 1969.
3. Атрушкевич П. А., Антоненко Э. М., Остропики П. А. Деформация земной коры на Алма-Атинском полигоне в связи с Сарыкамышским землетрясением.— В кн.: Земная кора Казахстана. Вып. 2. Алма-Ата, «Наука», 1971.
4. Атрушкевич П. А., Антоненко Э. М., Остропики П. А., Гриниха М. К. Новые данные о вертикальных движениях земной коры на Алма-Атинском геодинамическом полигоне.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
5. Горбунова П. В., Вырупаева Г. П., Дегтярева Л. А., Калмыкова Н. А. О сейсмическом режиме северного Тянь-Шаня перед сильным Пржевальским землетрясением 5 июня 1970 г.— «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1973, № 1.
6. Введенская А. В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М., «Наука», 1969.
7. Григоренко П. Г., Мамыров З., Садыбакасов И. С., Талипов М. А., Турдукулов А. Р. Геолого-структурные и инженерно-геологические условия Сарыкамышского землетрясения. Фрунзе, «Илим», 1973.
8. Землетрясения в СССР в 1970 году. М., «Наука», 1973.
9. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. М., «Наука», 1964.
10. Инструкция по эксплуатации светодальномера СГ-З. М., «Недра», 1971.
11. Куликовский К. Т. О связи современных движений земной коры с неотектоникой северных подножий хребта Зайлиского Алатау.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
12. Мецкерков Ю. А. Изучение современных движений земной коры и проблема прогноза землетрясений.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 3. М., «Наука», 1968.
13. Сигалов В. М. О проекте изучения современных движений земной коры геодезическими методами на Алма-Атинском геодинамическом полигоне.— В кн.: Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. Алма-Ата, 1973.
14. Aggarwal Y. P., Sykes L. R., Armbruster J., Sbar M. L. Premonitory changes in seismic velocities and prediction of Earthquakes.— "Nature", 1973, 241.
15. Bulanger J. D., Pewnew A. K., Enman V. B., Atrushkevich P. A. and Antonenko E. M. Geodetic studies and forerunners of Earthquakes.— "Tectonophysics", 1972, 14 (3/4).
16. Fujii Y. Relation between maximum vertical displacements of the crust and magnitudes of earthquakes and its application to the problem of Earthquake prediction.— "Bull. Geogr. Surv. Inst.", 1969, 15.
17. Fujii Y. Relation between Duration Period of the Preseismic Crustal Movement and Magnitude of the Earthquake.— "J. Geodetic Soc. Jap.", 1973, v. 19, N 1.
18. Fujita W., Fujii Y. Deformed Phases of seismic Crustal Movement.— "Journal of the Geodetic Society of Japan", 1973, v. 19, N 1.
19. Lensen G. J. Phases, nature and rates of earth deformation, recent crustal movements. Roy. Soc. New Zeal., Bull. 9, 1971.
20. Nur A. Dilatancy, Porefluids and premonitory variations of t_s/t_p travel times.— "Bull. Seismol. Soc. Amer.", 1972, 62.
21. Reid H. F. Mechanics of the earthquake.— In: The California Earthquake of April 18, 1906. Carnegie Institution of Washington, Washington, D. C., 1969.
22. Scholz C. H., Jukes L. R., Aggarwal Y. P. Earthquake Prediction: A Physical Basis Science, v. 181, N 4102, 1973.
23. Scholz C. H. Crustal movements in tectonic areas.— "Tectonophysics", 1972, 14, N 3/4.

В. М. Сигалов

КАРТА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Для изучения современных движений земной коры и их возможных связей с сейсмичностью на территории Северного Тянь-Шаня создан региональный геодинамический полигон, на котором исследуются как вертикальные, так и горизонтальные составляющие современных движений земной коры.

Границы регионального полигона установлены на основе анализа карт сейсмичности, положения изосейст происшедших в этом районе крупнейших землетрясений (Беловодского 1885 г., Верненского 1889 г., Чиликского 1889 г. и Кебинского 1911 г.), расположения зон глубинных разломов и геолого-морфологического строения территории. Включенная в исследования сейсмоопасная территория Северного Тянь-Шаня (более 60 тыс. кв. км) на юге ограничена оз. Иссык-Куль, на севере — линией железной дороги Луговая — Алма-Ата — Сары-Озек.

В геолого-морфологическом отношении территория регионального полигона включает в себя Чуйскую и Илийскую впадины, разделенные слабо поднятыми Чу-Илийскими горами, крупнейшие хребты Северного Тянь-Шаня — Заилийский и Кунгей Алатау и западные отроги Джунгарского Алатау. Тектоническое строение характеризуется большим числом разломов, главные из которых Заилийский, Джалаир-Найманский, Северо-Иссык-Кульский и Малайсаринский.

С 1935 по 1956 г. на территории полигона проложен ряд линий нивелирования 2-го класса, которые оконтуривают всю его площадь и одновременно рассекают ее на 5 частей. Протяженность трасс нивелирования около 2500 пог. км. Его точность характеризуется следующими значениями средних квадратических ошибок на 1 км хода: случайной $\eta = \pm 1,2$ мм и систематической $\sigma = \pm 0,18$ мм. Эти линии пересекают различные морфоструктуры, большое число разломов, проходят вблизи эпицентров крупнейших землетрясений. Все названные факторы дали основание использовать эти нивелирные линии для изучения современных вертикальных движений земной коры в границах регионального полигона. Для составления карты современных движений земной коры в 1970—1972 гг. нивелирование всех трасс повторено. Новое нивелирование исполнено в основном по программе 1-го класса, в труднопроходимых местах по методике 2-го класса. Точность повторного нивелирования характеризуется погрешностями (мм/км):

для 1-го класса $\eta = \pm 0,3$; $\sigma = \pm 0,02$;

для 2-го класса $\eta = \pm 0,7$; $\sigma = \pm 0,15$.

Средневесовой интервал между повторными нивелировками в целом по полигону составил 29 лет, при этом 75% длин линий нивелировались повторно через 32 года, 6,5% — через 20 лет и 18,5% — через 15 лет.

Значения невязок скоростей вертикальных движений по отдельным нивелирным полигонам 3—8 мм/год. В связи с тем, что геодинамический полигон удален от равномерных пунктов на открытых водоемах на 3000 км, было признано целесообразным вычислить для региона относительные скорости вертикальных движений. При выборе исходного пункта руководствовались следующими требованиями: а) он должен быть устойчивым по физико-географическим факторам; б) стабилен тектонически; в) определен из высокоточного нивелирования.

Наиболее спокойный из всего регионального полигона в сейсмическом отношении — район Отара. В соответствии со схемой сейсмического районирования он расположен на границе 6- и 7-бальной сейсмичности.

В историческом плане здесь не отмечалось землетрясений выше 11-го энергетического класса. Как показали результаты 3-кратного нивелирования (1935, 1954 и 1970), этот район наиболее стабилен в тектоническом отношении. Значения относительных скоростей вертикальных движений здесь не превышают 1 мм/год, а их колебания за 35-летний период не более 2 мм/год.

На северо-запад от района Отара вдоль нивелирной трассы местность представлена расчлененным пенепленом с крайне маломощными рыхлыми отложениями. Нивелирование этого района выполнено в 1935 г. по программе 2-го класса, а в 1954 и 1970 гг. — по программе 1-го класса.

С учетом приведенных данных, а также полевого обследования, проведенного в 1959 (Е. А. Финько) и 1969 гг., в качестве исходного принят репер 20 490, расположенный в 20 км к северо-западу от района Отара. Относительно этого пункта составлены весовые функции. Уравнение скоростей выполнено по способу условных измерений, в результате чего получены вероятнейшие поправки к величинам относительных скоростей всех линий и вычислены ошибки скоростей всех узловых точек. В зависимости от расстояния до исходного пункта ошибки их определения находятся в пределах от $\pm 0,6$ до ± 3 мм/год. Максимальная ошибка относится к пункту Чилик, который дважды определялся из нивелирования 2-го класса. На основе вероятнейших значений относительных скоростей узловых пунктов вычислены величины скоростей промежуточных реперов. Знаки, признанные неустойчивыми, в результате проведенных обследований из дальнейшей обработки исключались.

В целях обоснования проведения изолиний скоростей современных движений внутри полигонов на топографические карты были нанесены разломы, эпицентры и изосейсты крупнейших землетрясений и реперы повторного нивелирования. В соответствии с установившейся практикой на карте относительных скоростей вертикальных движений Северного Тянь-Шаня изображены направленность и интенсивность современных вертикальных движений. Учитывая плотность сети повторного нивелирования, основные изолинии проведены через 1 мм/год.. В тех случаях, когда позволяла плотность расположения знаков и точность определения величины их скоростей для выделения границ отдельных тектонических блоков проведены дополнительные изолинии через 0,5 мм/год.

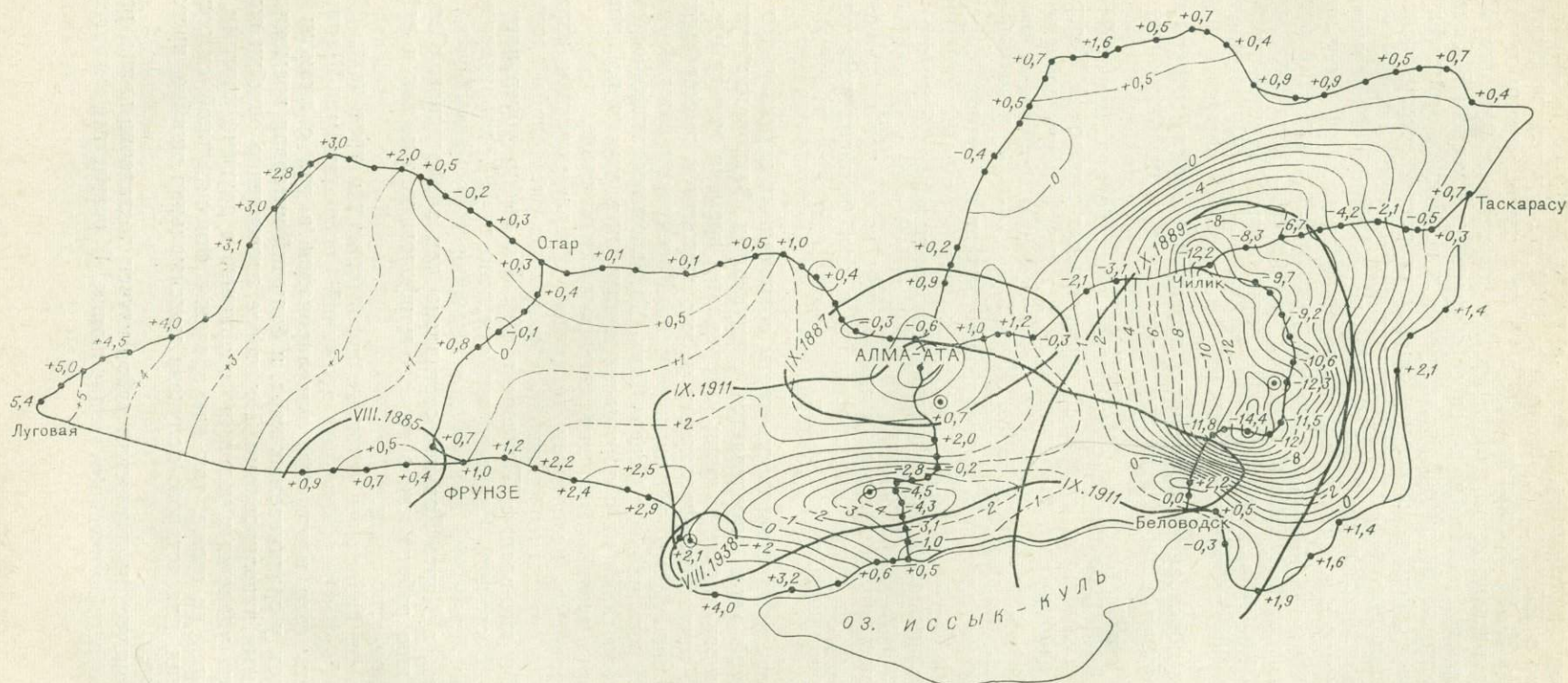
В некоторых местах со сложным морфологическим и тектоническим строением, расположенных внутри нивелирных полигонов на значительном удалении от трасс нивелирования, и при больших расстояниях между сохранившимися реперами изолинии показаны гипотетически (пунктиром).

Как известно, достоверность карты современных вертикальных движений земной коры определяется следующими факторами: густотой сети повторного нивелирования; интервалами времени между циклами повторений; качеством нивелирных работ; состоянием геоморфологической и тектонической изученности региона. Рассмотрим каждый из этих факторов на региональном Северо-Тянь-Шаньском геодинамическом полигоне и сопоставим их с соответствующими для других районов, на которые карты вертикальных движений составлены ранее.

Для сравнения используем технические характеристики карт современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы [1] и Кавказа и юго-востока Приазовья [3]. Их выбор обусловлен тем, что Карта Восточной Европы, как отмечено в [1], характеризуется комплексным подходом к проблеме изучения современных движений земной коры, а Карта Кавказа составлена для аналогичного Северному Тянь-Шаню района как в геолого-морфологическом, так и сейсмо-тектоническом отношении.

В таблице приведены основные характеристики трех карт, откуда следует, что карта вертикальных движений Северного Тянь-Шаня имеет плотность сети повторного нивелирования в два с лишним раза большую, чем у сравниваемых карт, и больший интервал времени между повторными нивелировками. Некоторое превышение ошибки вывода скорости для удаленных узлов, по сравнению с другими картами, особого значения не имеет, так как значение относительной скорости в пункте Чилик, для которого получена максимальная ошибка, превышает 12 мм/год.

В тектоническом отношении район изучен достаточно полно, вплоть до глубинного сейсмического зондирования. В результате этих исследо-



Скорости современных вертикальных движений Северного Тянь-Шаня, 1972 г.

1 — линии повторного нивелирования; 2 — пункт сети и его скорость; 3 — изолинии скоростей вертикальных движений, мм/год; 4 — гипотетические линии скоростей; 5 — максимальные изосейсты крупнейших землетрясений (9-балльность; 1911 г.); 6 — эпицентры соответствующих землетрясений.

Карта	Площадь на 1 км повторно- го нивели- рования, км ²	Периметр нивелирных полигонов, км			Средний интервал между повторе- ниями, лет	Ошибки определения вертикальных скорос- тей, мм/год
		мин.	макс.	ср.		
Восточной Европы	69	340	3700	1000	21	$\pm 0,5$ до $\pm 2,5$
Кавказа	57	513	2233	1200	25	$\pm 0,5$ до $\pm 1,3$
Северного Тянь-Шаня	24	591	760	640	29	$\pm 0,6$ до $\pm 3,0$

ваний составлены подробные тектонические карты, использованные при составлении карты современных движений.

На рисунке представлена составленная впервые на данную территорию карта относительных скоростей вертикальных движений земной коры. Учитывая неравномерность современных движений земной коры во времени, их знакопеременность, особенно в сейсмических районах, мы отнесли положение изолиний равных скоростей на Карте Северного Тянь-Шаня к эпохе 1972 г., году завершения повторного нивелирования геодинимического полигона. Изучая данную карту, можно отметить следующее.

Район Северного Тянь-Шаня отличается большой дифференциацией современных вертикальных движений по интенсивности и направленности: от $+5,4$ до $-14,4$ мм/год. Максимальные положительные скорости относятся к подгорным долинам, примыкающим к Киргизскому хребту, что указывает на вовлечение их в поднятие.

Для большей части Илийской впадины, особенно для Джаркентской депрессии, характерно опускание со скоростями до 12 мм/год, которое совпадает по знаку с новейшими движениями, отраженными на карте неотектоники [2], и является унаследованным. Западная и северная оконечности Илийской впадины испытывают знакопеременные движения со скоростями не более 1 мм/год. В отрогах Джунгарского Алатау скорости положительные, до $+1$ мм/год.

В районах Чиликского 1889 г. и Кебинского 1911 г. катастрофических землетрясений отмечаются интенсивные опускания земной коры. У эпицентра Чиликского землетрясения скорость достигла максимальной во всем регионе величины $-14,4$ мм/год. У эпицентра Кебинского землетрясения отрицательные скорости $-4,5$ мм/год, при отрицательной корреляции направления движений в данную эпоху с формами рельефа. Отрицательная относительно смежных тектонических блоков скорость установлена в районах эпицентров Беловодского землетрясения 1885 г. и Кеминско-Чуйского 1938 г.

Характерная особенность карты — совпадение ориентировок линий равных скоростей и изосейст перечисленных землетрясений, что указывает на связь в Северном Тянь-Шане современных вертикальных движений в данную эпоху с установленными зонами сейсмичности.

Сопоставляя величину скорости вертикальных движений земной коры со значениями скоростей в остальных частях геодинимического полигона и с величинами β -движений в местах происшедших в последние годы в Тянь-Шане землетрясений [4], было высказано предположение, что скорость в районе Чилика аномальна. Учитывая отрицательную корреляцию знака движений и профиля трассы в эпицентральной зоне Кебинского землетрясения 1911 г., этот район также отнесен нами к аномальным [5].

В настоящее время получено подтверждение правильности анализа. 12 февраля 1975 г. в 140 км на юго-восток от Алма-Аты (в районе Чилика) произошло землетрясение с магнитудой, близкой к 5. Основываясь на выполненных исследованиях, учитывая использованные при составлении данной карты материалы, можно считать, что рассмотрен-

ная карта базируется на комплексном использовании геодезических, геолого-морфологических, тектонических и сейсмических данных и достоверно отображает характер и величину современных вертикальных движений земной коры в Северном Тянь-Шане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буланже Ю. Д., Лилиенберг Д. А. Итоги международного сотрудничества стран Восточной Европы по составлению сводной карты современных движений земной коры.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
2. Гзовский М. В., Крестников В. Л., Монов Н. Н., Рязанов И. А., Рейснер Г. И. Карта новейших тектонических движений Средней Азии.— Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1960, № 8.
3. Матцкова В. А. Карта скоростей современных вертикальных движений земной коры Кавказа и юго-востока Приазовья.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 3. М., Тарту, 1968.
4. Сигалов В. М. О характере вертикальных движений земной коры в районах землетрясений.— «Геодезия и картография», 1974, № 1.
5. Сигалов В. М. Исследование современных движений земной коры и их возможных связей с сейсмичностью на территории Северного Тянь-Шаня. Автореф. канд. дис. М., 1974.

А. К. Певнев, Т. В. Гусева, Н. Н. Одинаев, Г. В. Сапрыкин

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ ПАМИРА И ТЯНЬ-ШАНЯ

Гармский полигон расположен в зоне Южно-Тянь-Шаньского глубинного разлома. Он приурочен к северной границе разломной зоны, которая в рассматриваемом районе в основном совпадает с долиной р. Сурхоб и поэтому именуется Сурхобским разломом (рис. 1). Полигон расположен вблизи наиболее сейсмоактивной зоны рассматриваемого района, приуроченной к осевой части хр. Петра Первого. Тектоническая история фиксирует очень сложную картину деформаций земной поверхности в разломной зоне: наряду с многокилометровыми вертикальными смещениями здесь установлены и значительные горизонтальные перемещения.

Как известно, изучение современных горизонтальных и вертикальных движений земной поверхности в Гармском районе начали еще в 1948—1949 гг. Тогда была создана сеть микротриангуляции и проложен нивелирный ход. Построение названо «Руноу», поскольку расположено в долине и на бортах сая Руноу. Общее протяжение геодезической сети составляло 7 км. Опорные пункты этой сети расположены за пределами разломной зоны в кристаллических палеозойских породах горы Миндалюль (отроги Гиссарского хребта), относящейся к Тянь-Шаню. Остальные пункты сети расположены на стороне хр. Петра Первого, относящегося к Памиру. К сожалению, сеть не пересекла целиком разломную зону: все ее пункты, находящиеся на Петровской стороне, расположены в пределах этой зоны. Повторные измерения сети, выполненные в 1968 г., зафиксировали «приближение» всех пунктов, которые находились в разломной зоне, к исходным пунктам на 30—40 см, что соответствует среднегодовому сдвигу на 15—20 мм. Таким образом геодезическими измерениями были получены данные, подтверждающие предположение о наличии горизонтальных смещений земной поверхности в рассматриваемой разломной зоне. Однако ввиду малых размеров геодезической сети делать вывод о региональном характере обнаруженного явления было преждевременно. Кроме того, было целесообразно наряду с

стороне речной долины в мезокайнозойских породах отрогов хр. Петра Первого. Вторая сеть представляет собой треугольник со сторонами от 8 до 15 км. Это построение названо треугольник. Один из пунктов треугольника (М) принадлежит Тянь-Шаньской системе (гора Миндалюль), два других (Ш и Ф) — Памирской.

Пункты Ш и Ф расположены по разные стороны от микротриангуляционной сети Руноу. Высотное расположение обеих сетей существенно различно: если пятиугольник (включая сеть Руноу) расположен на высоте около 1 км, то треугольник — на высоте около 2 км. Основное назначение большого треугольника — расширение исследуемой площади с целью увеличения репрезентативности данных о горизонтальных смещениях земной поверхности.

Измерение сторон на пятиугольнике, треугольнике и на некоторых пунктах триангуляции было выполнено светодальномером СГ-3, исходные измерения осуществлены в 1972 г., а повторные в 1973 и 1974 гг. Можно полагать, что реальная ошибка измерения линий длиной до 3 км составляет 3—5 мм, до 15 км — 10 мм. Результаты сравнения измерений трех лет показали, что все без исключения стороны между пунктами, расположенными на противоположных бортах р. Сурхоб, уменьшились за два года на 28—41 мм. На рис. 2 показаны векторы годовых скоростей горизонтальных смещений для шести пунктов, расположенных в разломной зоне, т. е. на левобережье р. Сурхоб южнее северной границы указанной зоны. Точки С и 2 — это пункты микротриангуляции Руноу. Их горизонтальные смещения определены относительно исходных точек VIII и III. Как уже отмечалось выше, эти исходные пункты расположены вне пределов Сурхобского разлома в кристаллических палеозойских породах отрогов Гиссарского хребта (гора Миндалюль). Смещения пунктов 24 и 829 (пятиугольник) определены относительно пунктов 50 и 3179, заложенных в те же кристаллические палеозойские породы горы Миндалюль, что и пункты VIII и III. Смещения пунктов Ш и Ф вычислены относительно пункта М, заложенного на вершине горы Миндалюль. Таким образом, все три описанные построения для изучения горизонтальных смещений опираются на одну структуру — гору Миндалюль. Векторы смещений всех шести пунктов достаточно хорошо согласуются и по направлению, и по величине (см. рис. 2). Проведенный эксперимент с полной определенностью подтвердил существование сближения отрогов хребта Петра Первого и Гиссарского. Хребты сближаются почти в меридиональном направлении со скоростью 15—20 мм/год. Конечно, говорить о сближении хребтов мы должны с большой осторожностью из-за небольших размеров исследуемой площади. Цель дальнейших исследований — определение площади указанной явления, а также изучение всех тонкостей пространственных и временных деформаций на небольших сетях, подобных пятиугольнику.

Теперь обратимся к результатам измерения вертикальной составляющей движений земной коры на Гармском полигоне. В 1948—1949 гг. был проложен нивелирный ход Руноу (рис. 3) протяженностью около 7 км. Второй период в развитии указанных исследований относится к 1957—1958 гг., когда было заложено основное кольцо Гармского полигона (длина кольца около 10 км). До 1969 г. повторные измерения на кольце проводились с периодичностью примерно через год. К этому времени были определены границы измерения скоростей движений и достаточно точно найдены их средние величины (рис. 4). В пределах Гармского полигона выявлены участки земной поверхности с существенно различающимися скоростями движений — от 0 до 15 мм/год. Дальнейшие исследования потребовали более детального изучения закономерностей смещений внутри годовых интервалов, поэтому в 1971 г. частоту повторных измерений довели до 8—10 в год. Результатом этого эксперимента явилось обнаружение аперiodических знакопере-

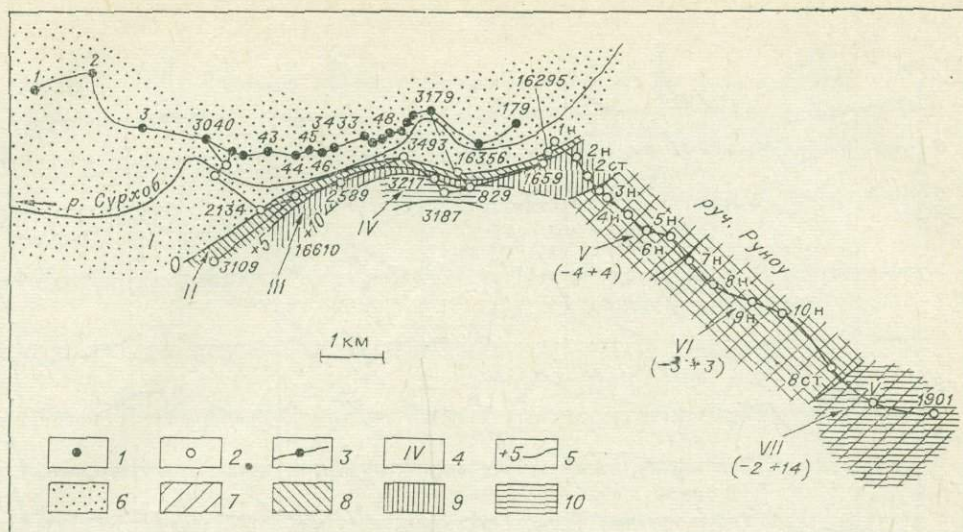


Рис. 3. Вертикальные смещения на Гармском полигоне.

1 — скальный репер; 2 — грунтовой репер; 3 — линия нивелирования; 4 — номер блока; 5 — линия равных скоростей; 6—10 — скорости смещений, мм/год: 6—0, 7—(-0-5), 8—(0+5), 9—(+5+10), 10—(+10+15).

менных наклонов всей площадки, на которой расположен полигон. Отмеченная закономерность особенно наглядно прослеживается на реперах, заложенных в горе Миндалюль, наклоняющейся как единый блок (см. рис. 4). На графиках отчетливо видно полное совпадение в смещениях реперов по фазе и увеличение амплитуды смещения с удалением от исходного репера.

Анализ материалов многократных повторных нивелирований на основном кольце и в Руchoy с полной определенностью указывает на значительную раздробленность исследуемой территории на мелкие блоки. Наше представление о расположении блоков показано на рис. 3.

Нужно отметить, что вычисление скоростей реперов проведено относительно исходного репера 3040, расположенного в скальных породах горы Миндалюль. Скорость этого репера принята равной нулю. В первом приближении рассматриваемую территорию можно разделить на пять блоков. К первому блоку отнесены реперы, имеющие нулевые средние скорости. Этот блок охватывает все реперы, расположенные на Тянь-Шаньской стороне, и часть реперов у подножия хр. Петра Первого. Во второй блок входят реперы со скоростями от +5 до +15 мм/год. Для более подробного расчленения этого блока у нас нет достаточных оснований. Этому блоку принадлежат реперы, расположенные в самом основании подножия хр. Петра Первого. Как и первый, этот блок отличается хорошей стабильностью средних скоростей вертикальных смещений земной поверхности. Наибольшие колебания скоростей (от -5 до +15 мм/год) выявлены для пятого блока, находящегося ближе остальных к зоне большой сейсмической активности. Для третьего блока скорости колеблются от -2 до +3 мм/год, а для четвертого от -5 до +2 мм/год. Найти действительную причину этой неустойчивости вертикальных смещений блоков в настоящее время не представляется возможным. Мы полагаем, что это явление может быть связано с вариациями напряжений в разломной зоне.

Совместное сопоставление данных о горизонтальных и вертикальных движениях земной поверхности на Гармском полигоне показывает, что наибольшей монолитностью обладает блок, включающий все реперы, расположенные на правом берегу р. Сурхоб, и часть реперов левого

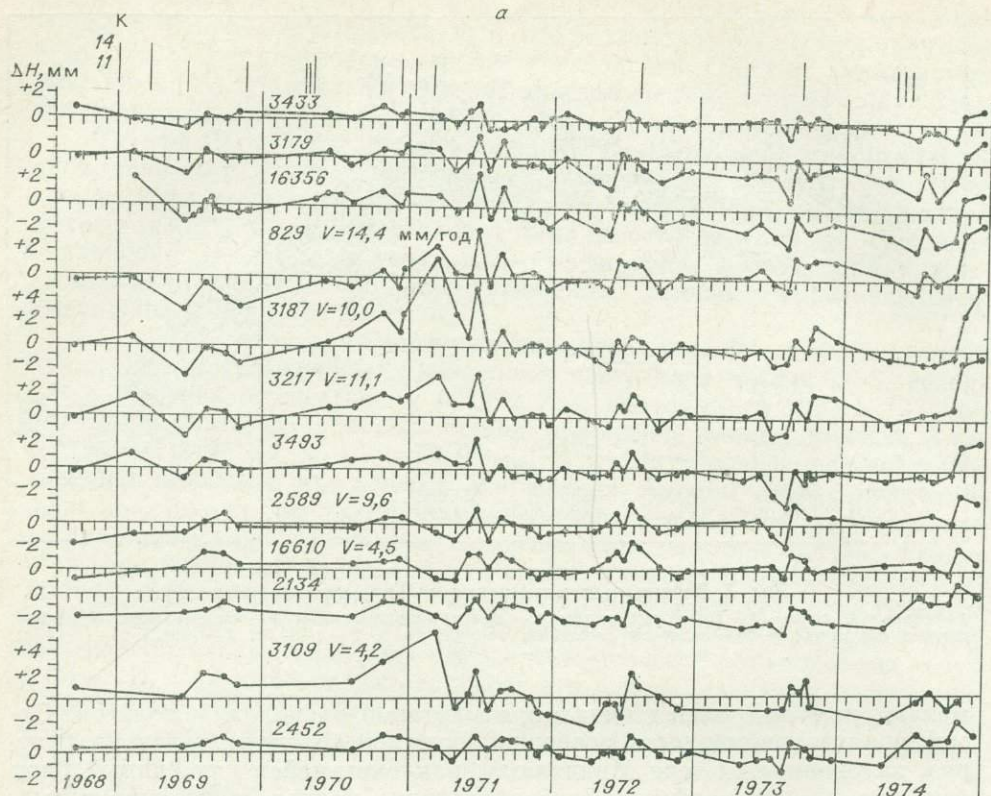
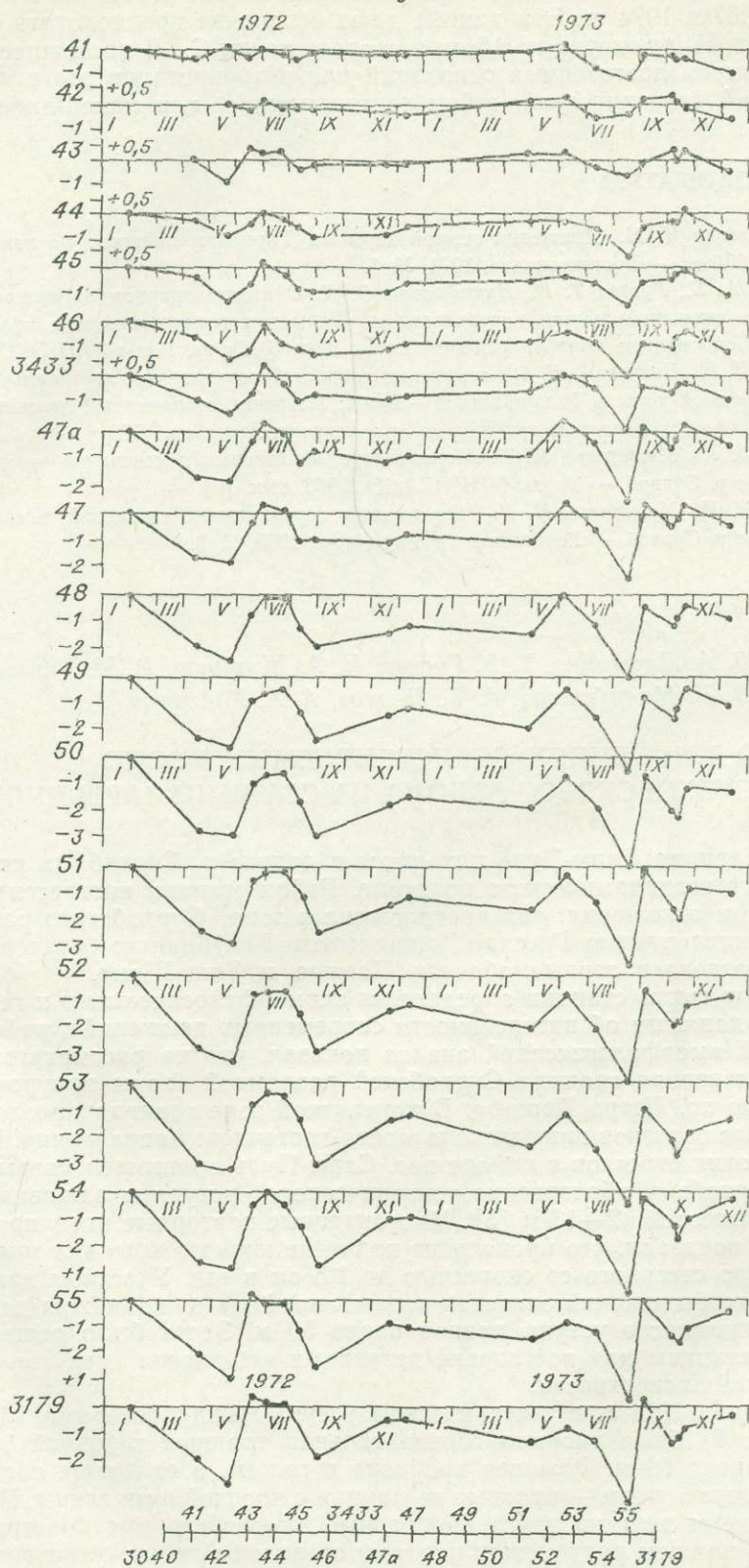


Рис. 4. Графики смещений реперов.

а — Гармского полигона; б — заложенных в скальные породы горы Миндалюль.

берега. Это реперы, имеющие нулевые скорости. Можно полагать, что южная граница этого блока совпадает с линией, отделяющей участок с нулевыми скоростями от участков с более высокими скоростями вертикальных смещений. Напршивается мысль о том, что эта линия представляет собой непосредственную линию тектонического контакта разломной зоны с Тянь-Шаньским блоком. Относительные горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности происходят по этой линии. Скорее всего мы имеем дело с надвиганием разломной зоны (или соответственно поддвиганием Тянь-Шаньского блока) по наклонной поверхности. Так как горизонтальная составляющая (15—20 мм/год) несколько превосходит вертикальную (5—15 мм/год), то надо думать, что угол наклона контактной поверхности составляет примерно 30—45°. Одна из первоочередных задач исследований на Гармском полигоне — создание геодезической сети, полностью перекрывающей разломную зону. На рис. 1 представлена деформационная сеть, расположенная в одном из тектонически сложенных узлов рассматриваемого района. Сеть позволит изучить горизонтальные смещения между тремя структурами: Гиссарским и Вахшским хребтами и хр. Петра Первого. На следующем этапе сеть целесообразно развить до Дарвазского хребта с тем, чтобы полностью перекрыть хр. Петра Первого и связать Гиссарский хребет с одной из Памирских структур.

Изучение движений земной поверхности на такой сети поможет найти действительную картину взаимных перемещений двух больших блоков, а следовательно, приблизит нас к решению вопроса о природе этих движений. На рис. 1 приведены данные об угловых изменениях в части деформационной сети вокруг точки Н₁. Приведенные изменения



углов представляют собой разницу одних и тех же углов, измеренных в 1966—1967 и 1974 гг. Эти данные дают основание предполагать смещение точки Н₁ примерно на 16 см в сторону точки С₄. В настоящее время мы не имеем достаточных оснований для интерпретации этого явления с позиций тектонической, сеймотектонической или какой-либо иной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конопальцев И. М. Движения земной коры на Гармском полигоне по измерениям 1948—1970 гг.— «Геотектоника», 1971, № 5.
2. Певнев А. К., Гусева Т. В., Никифорова О. Д. О нестационарном характере вертикальных смещений земной поверхности на Гармском геодинамическом полигоне.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
3. Энман В. Б., Певнев А. К. Об изменении скоростей современных вертикальных движений земной коры в Таджикистане.— В кн.: Изучение современных движений земной коры на стационарных геофизических полигонах. Ашхабад, 1970.
4. Энтин И. И., Мецкерский И. Н. Определение вертикальных смещений земной коры в долине р. Сурхоб.— «Труды ЦНИИГАиК», 1963, вып. 154.
5. Энтин И. И., Мецкерский И. Н. Определение вертикальных смещений земной коры в долине р. Сурхоб.— «Геодезия и картография», 1965, № 9.

*Л. А. Латынина, Т. В. Гусева, Н. А. Жаринов, Р. М. Кармалеева,
О. Д. Никифорова, А. К. Певнев, А. А. Хоботько*

О ДВИЖЕНИЯХ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ В ЗОНЕ СУРХОБСКОГО РАЗЛОМА НА СТАНЦИИ САРЫ-ПУЛЬ

Станция Сары-Пулъ находится в долине р. Сурхоб, на профиле Гармского геодинамического полигона. Район станции интересен в тектоническом отношении: она расположена в зоне Сурхобского разлома, являющегося частью Гиссаро-Кокшальского глубинного разлома, который разделяет горные области Памира и Тянь-Шаня.

Выбор места станции определялся геоморфологическими и геодезическими данными об интенсивности современных движений в районе полигона. Геоморфологический анализ показал, что на рассматриваемом участке северная граница Сурхобской разломной зоны приурочена к подножию хр. Петра Первого. В контактной зоне граница прослеживается в виде отрезков широтного и северо-восточного направления. По одному из этих отрезков в районе пос. Сары-Пулъ произошел разрыв террасы Сурхоба и образование тектонического уступа в аллювиальных породах высотой 12—13 м [5]. Многократные повторные нивелирования профиля показали, что происходит поднятие южного крыла разрыва относительно северного со скоростью до 1,5 см в год. Участком наиболее контрастных движений оказался отрезок профиля от подножия до бровки тектонического уступа длиной около 50 м. Здесь было решено построить станцию для постановки детальных наблюдений над движениями земной поверхности.

В конце 1971 г. в тектоническом уступе между реперами 16356 и 859 (рис. 1) была прорыта горизонтальная траншея глубиной 14 м и длиной около 60 м. Траншея пройдена в гальке, а ее днище составляют коренные породы — красные песчаники с прослойками глины. В траншее уложены друг на друга П-образные железобетонные конструкции, причем в нижнем ряду между плитами оставлены промежутки шириной 1 м. Сверху все сооружение засыпано грунтом. Глубина засыпки от 2 м

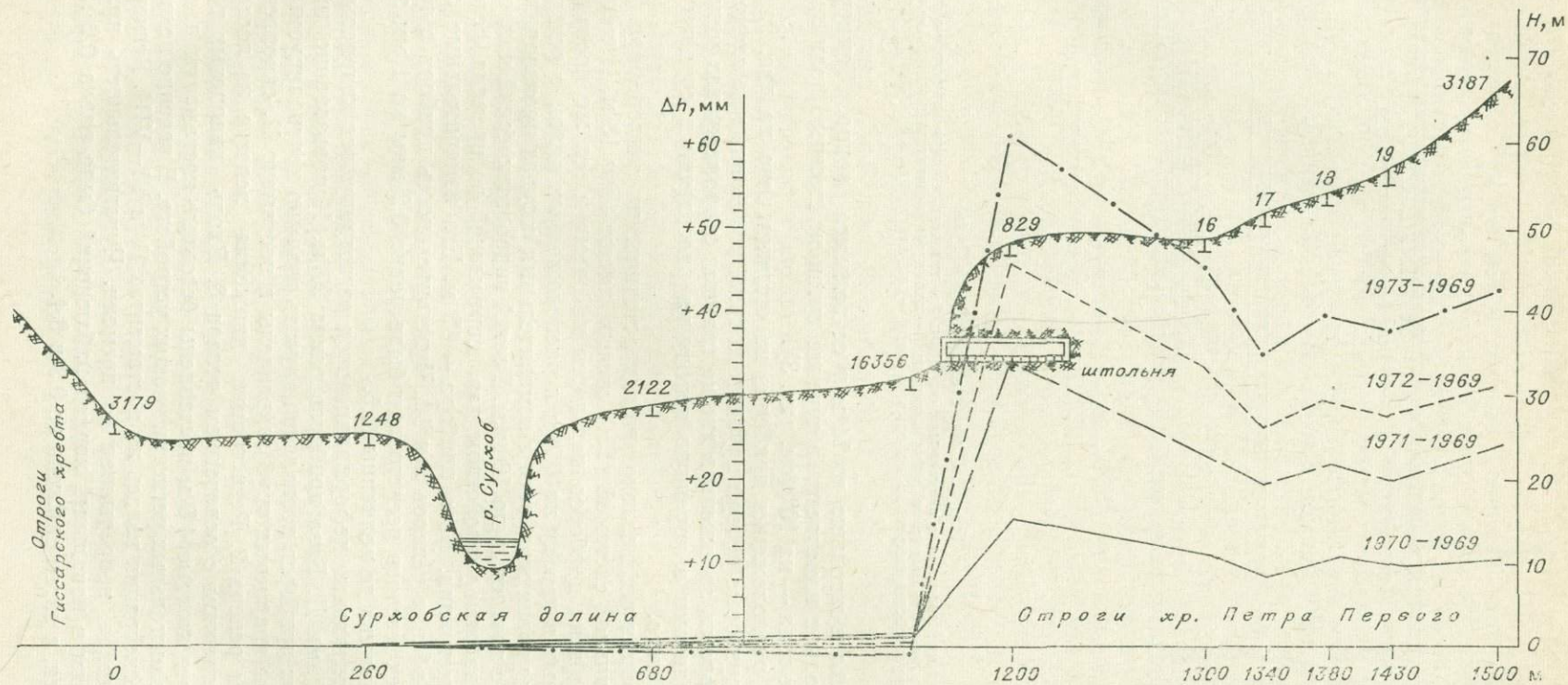
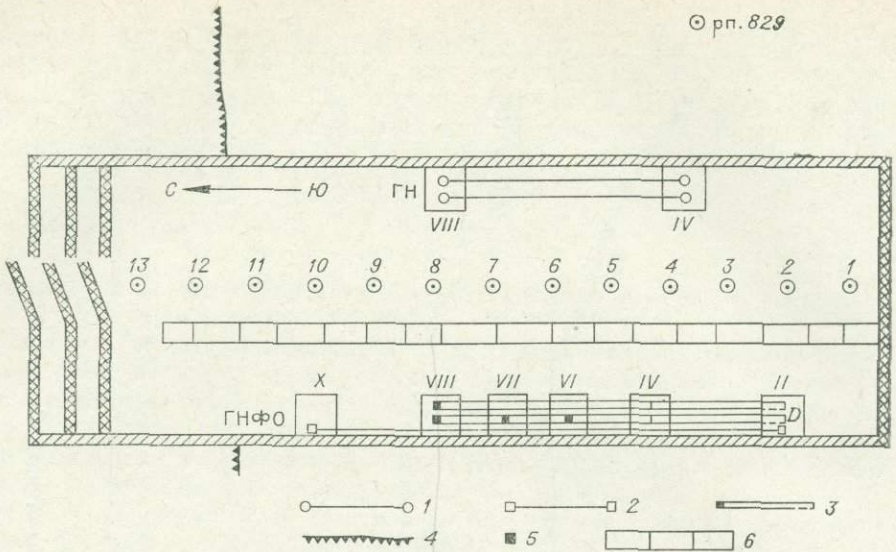


Рис. 1. Гипсометрический профиль и вертикальные смещения реперов в районе станции Сары-Пуль.



⊙ рп 16356

Рис. 2. План станции Сары-Пуль.

1 — гидростатические нивелиры с визуальным отсчетом; 2 — гидростатические нивелиры с фотооптической регистрацией; 3 — кварцевые деформографы; 4 — линия тектонического уступа; 5 — регистрирующее устройство кварцевых деформографов; 6 — заградительная кирпичная стенка.

вблизи входа в штольню до 14 м у ее дальнего конца. Температура внутри штольни изменяется в течение суток на десятые доли градуса, а в течение года — на 10° (см. рис. 3).

Схема расположения приборов на станции дана на рис. 2. Геодезические грунтовые реперы трубчатого типа, показанные на схеме кружками и цифрами, заложены в днище траншеи в промежутках между бетонными плитами в коренную породу на расстоянии в среднем 4,5 м один от другого.

На станции установлено три гидростатических накломера. Два из них с визуальной системой (ГН) отсчета имеют базу 18 м. Измерительные сосуды этих приборов находятся на одних и тех же постаментов, заглубленных в породу на 0,7 м и расположенных рядом с реперами 4 и 8. Отсчет уровня жидкости в измерительных сосудах производится раз в 3—4 сут с точностью до 10 мкм. Третий гидростатический накломер (ГНФ0) снабжен устройством для непрерывной во времени фотооптической регистрации. База прибора — 42 м. Его измерительные сосуды находятся вблизи реперов 2 и 10. Чувствительность прибора в течение первых трех месяцев регистрации была равна 0,2 мкм на 1 мм записи, а затем снижена до величины 1,5.

Горизонтальные деформации пород регистрируются кварцевыми деформографами Д. База приборов равна 27 м. Использование двух параллельных приборов позволяет получать взаимно контролируемые данные. Концы кварцевых труб закреплены в постамент II, скрепленный с основанием репера 2. Регистрация движения ведется на постаменте VIII, скрепленном с основанием репера 8. Вдоль кварцевых труб на породе через каждые 4,5 м поставлены бетонные постаменты для установки дополнительных регистрирующих устройств. В течение некоторого периода регистрация велась на постаментах IV и VI—VIII. Регистрация фотооптическая, непрерывная во времени. Чувствительность приборов к смещениям в начальный период наблюдений была равна 0,2 мкм на 1 мм записи, а затем снижена до 0,3 и 0,4.

Прежде чем перейти к анализу движений, зарегистрированных на станции Сары-Пуль, мы кратко остановимся на существующих данных о вертикальных движениях в районе Гарма. По геолого-тектоническим данным современные структуры Гармского района образовались в результате вертикальных различных по величине перемещений блоков земной коры [1]. Такими блоками на рассматриваемом участке являются блок Миндалюль на севере и Чорчоргский блок на юге. Согласно геоморфологическим исследованиям, южное крыло Сурхобского разлома поднимается относительно северного, и на отдельных отрезках разрыва средняя скорость вертикальных движений за период порядка 10 000 лет достигает 8 мм в год [4]. Многолетние геодезические наблюдения показали, что имеет место устойчивое поднятие группы реперов, находящихся в пределах Чорчоргского блока, относительно исходного репера, заложенного в скальные породы горы Миндалюль, со скоростью 10—15 мм в год [5]. На рис. 1 приведены данные повторного нивелирования за 1969—1972 гг. Грунтовый репер 16 356, находящийся возле тектонического уступа и входящий с 1969 г. в основной ход кольца Гармского полигона, не обнаруживает систематического перемещения относительно исходного репера. Его средняя скорость близка к нулю, а наибольшее отклонение от среднего положения составляет $\pm 1,5$ мм. Репер 829, расположенный на тектоническом уступе, смещается относительно исходного репера со скоростью 14,4 мм в год в период 1966—1973 гг.

Первое нивелирование на станции Сары-Пуль было выполнено в декабре 1971 г. Нивелирный ход, проходящий по реперам 13—1 штольни, связан с грунтовым репером 16 356. С 14.XII 1973 г. по 27.I 1975 г. выполнено 8 циклов нивелирования, которые показали, что в штольне на базе в несколько метров происходят контрастные движения. Реперам 12 и 13 свойственны в рассматриваемый период нисходящие смещения относительно репера 16 356 со скоростью 13,5 и 10,7 мм в год. Видимо, опускание этих реперов вызвано тем, что происходит усадка насыпного грунта, в который заложены их основания. В последнюю половину года скорость их опускания уменьшилась до 5 и 3 мм в год. Следующие реперы имеют небольшие нисходящие движения. Скорость репера 11 равна 2 мм в год, а репера 10 — 0,6 мм в год, и у него намечается тенденция к изменению знака движения. На отрезке между реперами 10 и 9 длиной 4,5 м происходит смена знака вертикальных движений, и следующие 9 реперов поднимаются относительно репера 16 356 со следующими скоростями: 9—4,5; 8—10,9; 7—12,3; 6—12,8; 5—14,1; 4—14,3; 3—14,8; 2—15,1; 1—15,0 мм в год. Скорость постоянна во времени. Точность определения смещений равна 0,5 мм. Отметим, что репер 829, находящийся на тектоническом уступе и обнаруживающий в течение длительного промежутка времени поднятие относительно исходного репера со скоростью 14—15 мм в год, находится против репера 4-й штольни. Графики вертикальных смещений по данным повторных нивелирований 1974 г. даны на рис. 3. Смещения отсчитываются относительно репера 2, который принят неподвижным во времени. Такой порядок отсчета взят для того, чтобы сопоставить вертикальные и горизонтальные смещения в штольне. Последние регистрируются деформографами между точками 2 и 4, 6—8.

Ход вертикальных смещений, построенный по данным гидростатических наклономеров, показан на рис. 3. Гидростатические приборы ГН с базой 18 м (см. рис. 2) зарегистрировали опускание постаментов VIII относительно постаментов IV, равное 6 мм за период с октября 1972 по февраль 1975 г. Движение происходит с примерно постоянной скоростью. Исключение составляет лишь период с декабря 1972 по февраль 1973 г., когда имело место знакопеременное перемещение. Ход смещений по

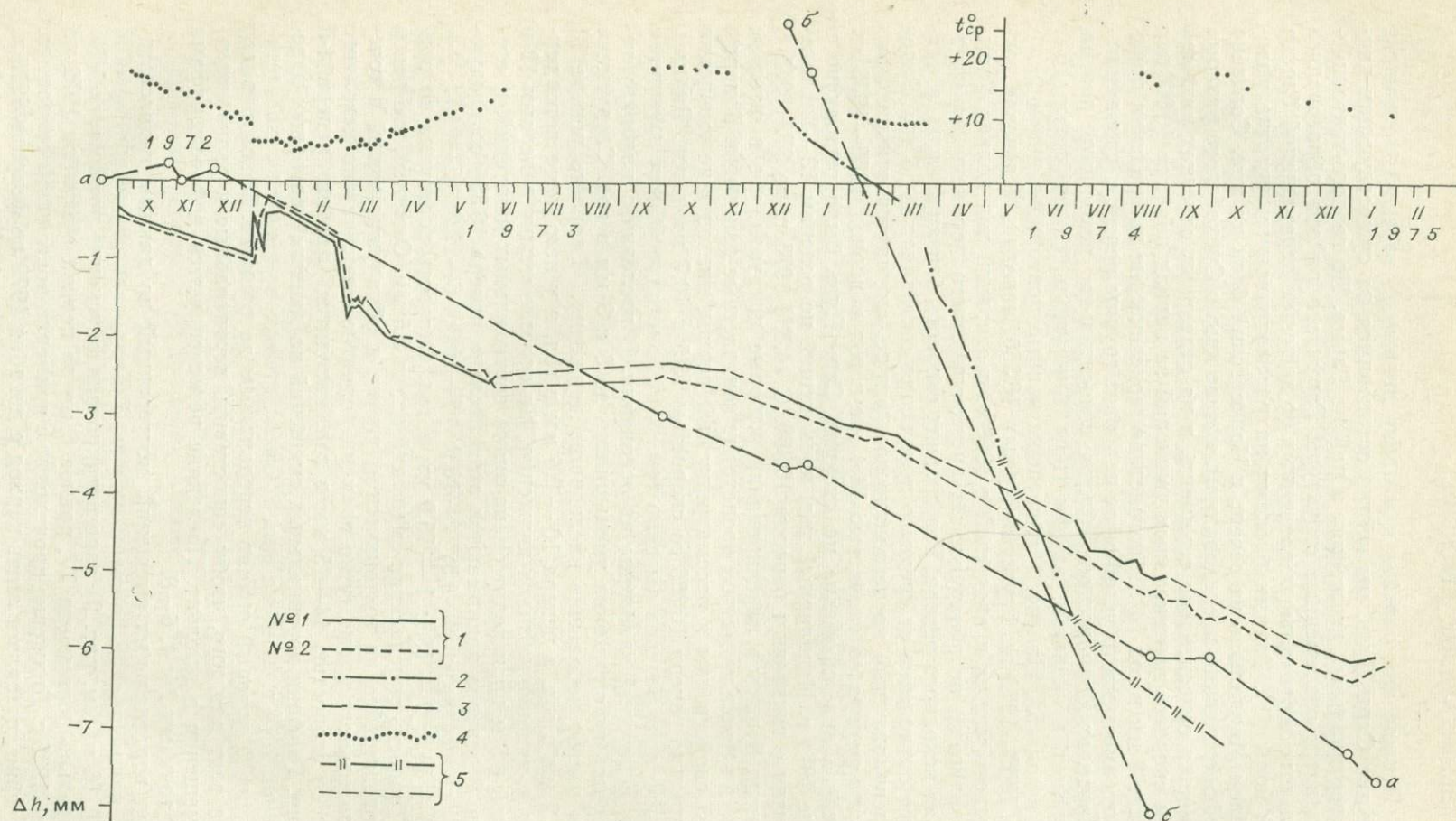


Рис. 3. Вертикальные смещения по данным повторных нивелирований и гидростатических нивелиров.

1 (№ 1 и 2) — смещения между реперами 4—8 по данным двух гидростатических нивелиров с визуальным отсчетом; 2 — смещения между реперами 2—10 по данным гидростатического нивелира с фотооптической регистрацией; 3 — смещения по данным нивелировок; а-а — между реперами 4—8; б-б — между реперами 2—10; 4 — температура воздуха внутри штольни; 5 — пропуски в наблюдениях.

данным параллельных приборов совпадает с точностью до 100 мкм. Смещение репера 8 относительно репера 4 по данным повторных нивелирований за весь указанный период равно 7 мм (см. рис. 3). Различие в величине перемещений (6 и 7 мм) по данным гидростатических и геодезических измерений связано, видимо, с тем, что точки закрепления реперов и установки сосудов ГН не совпадают. Репер же 4 и постамент IV находится в пределах сильно раздробленного участка, где могут иметь место значительные локальные подвижки. На том же рисунке показан ход вертикальных смещений по данным гидростатического наклонометра ГНФО с базой 42 м точки X относительно точки II. Смещение за 8 месяцев больше 8 мм. Точная величина смещений не определена, так как в записи прибора имеются перерывы. Смещение репера 10 относительно репера 2 за тот же период равно 11—12 мм.

Таким образом, данные о вертикальных смещениях в штольне, полученные путем нивелирования и с помощью гидростатических приборов, достаточно хорошо совпадают. Наиболее контрастны вертикальные смещения на участке между реперами 8 и 10 или соответственно постаментами VIII и X.

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Остановимся кратко на данных о горизонтальных движениях в районе Гарма. Геолого-тектонические исследования говорят о том, что данный район находится в состоянии общего горизонтального сжатия [1]. В 1948 г. в районе Гарма по долине руч. Руноу была заложена триангуляционная сеть. Измерения 1968 г. показали, что все точки, находящиеся в пределах хр. Петра Первого, переместились по направлению к Гиссарскому хребту на 200—400 мм. Так как закономерных различий в смещениях точек хр. Петра Первого на профиле протяженностью 20 км нет, в первом приближении можно считать, что южное крыло разлома движется как целое относительно северного. Измерения 1970 и 1971 гг. подтвердили эти результаты [2].

В 1972 г. в районе пос. Сары-Пуль вкост Сурхобской долины начаты измерения горизонтальных движений оптическими дальномерами. Репер, находящийся на тектоническом уступе вблизи штольни, смещается в направлении к реперу на горе Миндалюль. База измерения — 700 м. В период 1972—1973 гг. здесь было зарегистрировано смещение, равное 20 мм, в 1973—1974 гг. — 16 мм. В течение ряда лет в районе Гарма работают четыре деформографические станции: Сары-Пуль, Гарм, в 50 км к востоку от Гарма — Чусал и в 50 км к югу от Гарма — Чиль-Дора. Всеми этими станциями регистрируется сжатие породы. Скорость сжатия различна на разных станциях и меняется от $0,5 \cdot 10^{-6}$ на станции Гарм до $2 \cdot 10^{-6}$ на станции Чусал [3].

Переходим к данным о горизонтальных движениях на станции Сары-Пуль. На рис. 4 показано изменение горизонтальных деформаций, зарегистрированное деформографами с декабря 1973 по октябрь 1974 г. на базе 27 м. Смещение точки VIII относительно точки II (см. рис. 2) равно за этот период 1 мм, а экстраполируя эти данные, получим для скорости смещений величину 1,5 мм в год. Деформация породы имеет характер сжатия и происходит со скоростью $50 \cdot 10^{-6}$ в год. Деформация со столь высокой скоростью не была отмечена ни на одной из работающих в Средней Азии деформографических станций. Изменения деформации во времени происходят нелинейно. Данных пока недостаточно для четкого разделения медленных и сезонных явлений. Однако ясно, что сезонная волна деформаций велика. Амплитуда сезонной волны деформаций порядка 10^{-5} . В период с декабря по март наблюдалось ин-

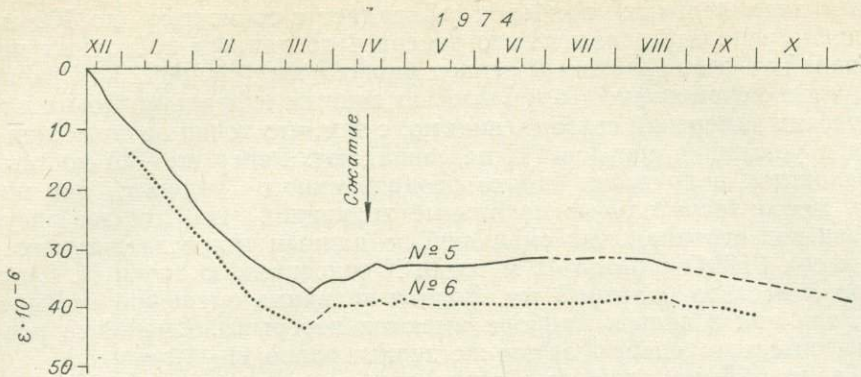


Рис. 4. Горизонтальные деформации по данным кварцевых деформографов.

тенсивное сжатие породы. В марте скорость деформации изменила знак. С мая по август происходило медленное расширение породы, чередовавшееся с периодами отсутствия движений. Затем началось сжатие породы, которое в ноябре достигло скорости $5 \cdot 10^{-6}$ в месяц. Приведенные данные получены по записи движения двумя приборами Д, установленными параллельно и на одной базе (см. рис. 2). Кривые на рис. 4 демонстрируют степень совпадения показаний разных приборов. Заметим, что инструментальными эффектами указанное движение объяснить нельзя. Дрейф прибора, обусловленный изменениями температуры в штольне, равен $5 \cdot 10^{-6}$ и на порядок меньше зарегистрированной приборами деформации.

С декабря 1973 по март 1974 г. регистрация смещений велась не только на постаменте VIII, но и на постаментах IV, VI, VII. Работало, по существу, пять деформографов. Деформация на исследуемом профиле оказалась неоднородной. Скорость деформации минимальна на отрезке II—IV и максимальна на отрезке II—VIII. О характере распределения горизонтальных деформаций вдоль штольни дает представление рис. 5, где показана величина изменения деформации на отрезках II—IV, IV—VI и т. д. Изменения деформации или ее скорости нарастают в направлении от точки II к точке VII. На отрезке VI—VIII деформация остается примерно постоянной.

Постаменты VI—VIII заложены на скальной породе. Постаменты IV и V оказались в интенсивно раздробленной обводненной зоне. Можно было предполагать, что именно на этом участке горизонтальное движение будет наиболее интенсивным, так как здесь порода менее жесткая. Однако такое предположение не оправдалось. Скорость деформации нарастает по направлению к точкам VII и VIII.

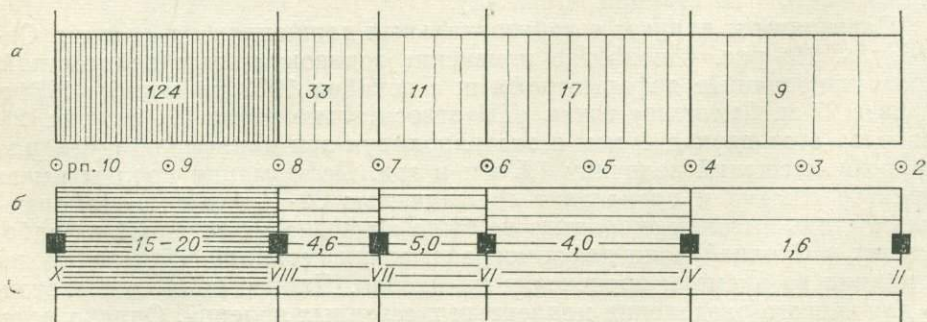


Рис. 5. Сравнение величин вертикальных (а) и горизонтальных (б) деформаций по профилю штольни [10^{-5}].

СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

На станции Сары-Пуль зарегистрированы большие скорости как вертикальных, так и горизонтальных смещений. На рис. 6 показаны вертикальные смещения последовательности реперов относительно репера 2, принятого за неподвижный. На рисунке показаны горизонтальные смещения постаментов IV, VI—VIII относительно II (см. рис. 2) за период с середины декабря 1973 по октябрь 1974 г.

Относительное вертикальное смещение точек 8 и 2 за рассматриваемый период равно 3—3,5 мм, относительное горизонтальное их смещение равно 1 мм. Наиболее контрастный характер имеют вертикальные смещения на участке 8—10. Относительное вертикальное смещение точек 10 и 2 равно 10 мм. К сожалению, данных о горизонтальных движениях на этом участке нет. Деформограф между постаментами VIII и X был поставлен в конце 1974 г. Судя по записи деформаций

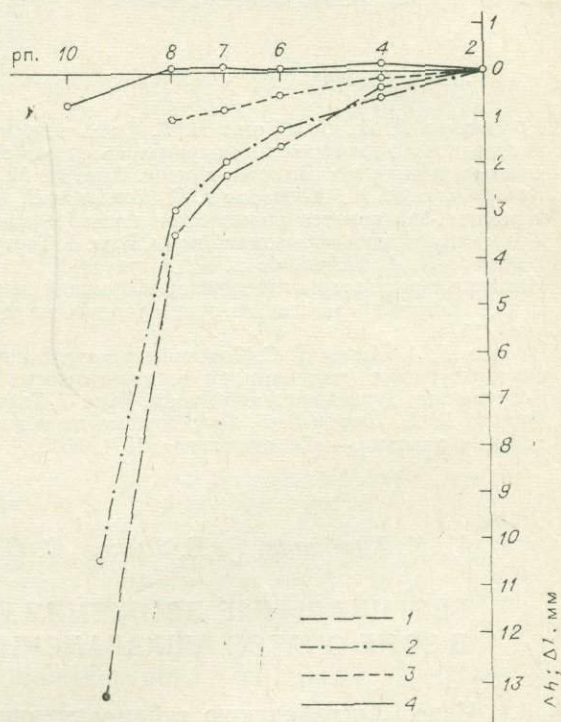


Рис. 6. Вертикальные смещения по данным нивелировок Δh и горизонтальные смещения по данным кварцевых деформографов Δl относительно репера 2.

1 — Δh 21.XII.73 — 18.XI.74; 2 — Δh 21.XII.73 — 22.VIII.74; 3 — Δl 20.XII.73 — сентябрь 1974; 4 — Δh 21.XII.73 — 4.I.74.

за первые несколько суток, относительное смещение точек 10 и 2 в 2,5 раза больше, чем смещение точек 8 и 2.

На рис. 5 дано распределение деформаций вдоль штольни за тот же период. (Речь идет не об абсолютной величине деформации, а об изменении деформации за указанный период.) Для каждого из отрезков 2—4, 4—6 и т. д. указана осредненная величина деформации.

И горизонтальная, и вертикальная компоненты деформации нарастают при перемещении от точки 2 к точке 8. Скорость нарастания вертикальной деформации на отрезке 8—10 резко увеличивается. Оценка горизонтальной деформации на этом участке весьма условна. Она сделана на основе очень кратковременной записи. Но, по-видимому, и горизонтальная деформация на этом участке велика. Характер изменения деформации при перемещении от точки 2 к точке 10 одинаков и для вертикальной, и для горизонтальной компоненты. Лишь на участке 7—6 вертикальная деформация оказалась аномально низка. Вертикальная деформация на каждом из участков примерно в 5 раз больше горизонтальной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вертикальные и горизонтальные деформации пород в штольне развиваются чрезвычайно интенсивно. Характер изменения обеих компонент деформаций в пространстве одинаков, деформации нарастают

при переходе от точки 2 к точке 10. Однако по величине вертикальная компонента деформации на половину порядка больше горизонтальной. Согласно геодезическим данным, скорости относительных вертикальных и горизонтальных смещений крыла разлома примерно одинаковы: 1—2 см в год. Максимальные вертикальные смещения сконцентрированы в узкой зоне, на участке штольни между реперами 10 и 6. Относительные горизонтальные смещения на участке между реперами 8 и 2 составляют примерно 20% от смещения бортов Сурхобской долины. Очевидно, горизонтальная деформация распределена в более широкой полосе по сравнению с вертикальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крестников В. Н., Симбирева Н. Г. Связь тектонического строения с особенностями распределения динамических параметров очагов землетрясения.— В кн.: Земная кора сейсмоактивных зон. Верхняя мантия. Вып. 11. М., «Наука», 1973.
2. Конопальцев И. М., Медведев В. Г., Давлатов Н. Д. Горизонтальные движения земной коры на Гармском геодинамическом полигоне по измерениям 1968—1971 гг.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, 1973.
3. Нерсесов И. Л., Латынина Л. А., Жаринов Н. А., Кармалеева В. М., Садовский А. М. Некоторые результаты измерения деформаций земной коры на Гармском полигоне.— В кн.: Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. М., «Наука», 1974.
4. Финько Е. А., Асоян Д. С. Соотношения современных вертикальных движений с морфоструктурными условиями на геодинамических полигонах Таджикистана.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
5. Финько Е. А., Энман В. Б. Современные движения земной поверхности в зоне Сурхобского разлома.— «Геотектоника», 1971, № 5.

М. К. Курбанов, В. И. Лыков, С. С. Челпанов

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ РЕПЕРОВ В ЗОНЕ ОЧАГОВ АШХАБАДСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Через Ашхабадскую сейсмоактивную зону проходят два региональных нивелирных профиля. Один — с северо-запада на юго-восток вдоль железной дороги от г. Красноводска до г. Чарджоу [1, 2]. Из графиков изменения превышений и графиков скоростей, построенных по данным повторных нивелирований, видно, что существует региональный фон современных движений земной поверхности вдоль осевой части прогиба с северо-запада на юго-восток с отрицательным знаком [2]. Помимо регионального фона современных движений на профиле можно выделить локальные участки, отличные как по интенсивности, так и по знаку. Один из таких участков расположен по линии Геок-Тепе — Ашхабад — Гяурс (рис. 1). Результаты нивелирования 1944 и 1952 гг. на этом участке показали резкое увеличение скоростей и перемену знака движений. На линии Геок-Тепе — Ашхабад наибольшее изменение в превышении было отмечено на грунтовой репере 222—(+330 мм), а на линии Ашхабад — Гяурс изменение превышения произошло на горизонтальной марке № 1630 (—230 мм). Таким образом, на участке в пределах 80 км амплитуда подвижки превысила 0,5 м (эпицентр катастрофического землетрясения 6.X 1948 г. лежит в центре этого участка). Данные нивелирования 1962 г. подтвердили происшедшее изменение. По графикам изменения отметок реперов за 1952—1962 гг. можно сказать, что региональное фоновое движение по профилю восстановилось, но уже от уровня 1948 г.

Другой профиль — меридиональный — проходит от г. Ашхабада до пос. Бахардок. Первое нивелирование выполнено по трассе Ходжейли —

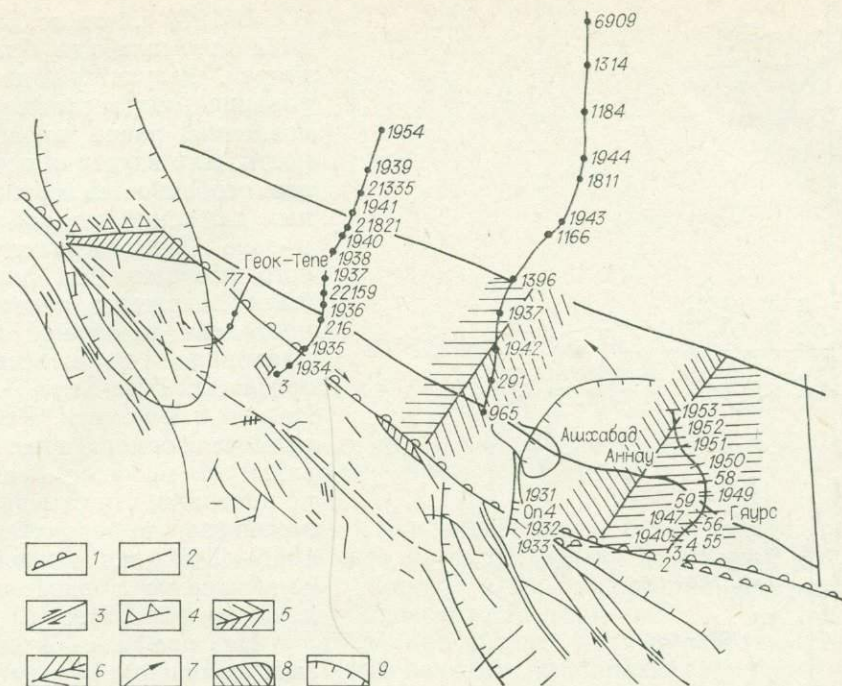


Рис. 1. Тектоническая схема Ашхабадского геодинамического полигона и расположение геофизических, геодезических пунктов.

1 — передовой глубинный разлом земной коры; 2 — разломы фундамента. Разломы осадочного чехла: 3 — сдвиги; 4 — надвиги. Зоны остаточных деформаций 1948 г.: 5 — поднятия; 6 — опускания; 7 — направление горизонтальных смещений по данным повторной триангуляции; 8 — участки интенсивных вертикальных перемещений по данным моделирования; 9 — контуры областей развития максимальных касательных напряжений.

Ашхабад в 1939 г., второе нивелирование — по трассе Ашхабад — Бахардок в 1962 г. [1].

Результаты повторного нивелирования показали, что с севера на юг относительно платформенной части (пос. Бахардок) происходит поднятие реперов, т. е. существует региональное поднятие земной поверхности в направлении с севера на юг [1]. На этом профиле тоже можно выделить локальный участок с аномально большими положительными значениями (до +960 мм на репере 1397). Изменение отметок реперов также можно связать с землетрясением 1948 г. Таким образом, из результатов государственного нивелирования на двух региональных профилях, пересекающих Ашхабадскую сейсмоактивную зону, можно выделить региональный фон современных движений земной поверхности: опускание с северо-запада на юго-восток и подъем с севера на юг. На этом фоне выделяются три локальных участка в центральной части Ашхабадской сейсмоактивной зоны, где отмечены наибольшие вертикальные положительные и отрицательные перемещения реперов. Эти локальные участки очень хорошо показаны М. Курбановым и С. Челпановым в статье «Некоторые результаты...» на рис. 2 и 3 [1].

В 1966 г. сотрудниками Института физики Земли и атмосферы АН ТССР было проведено нивелирование 1-го класса по меридиональному профилю от г. Ашхабада до пос. Бахардок, которое подтвердило результаты нивелирования 1962 г. и показало, что развитие локального участка происходит от уровня, образовавшегося в результате катастрофы 1948 г., и что реперы, наиболее сильно поднявшиеся в результате катастрофы 1948 г., за четыре года (1962—1966) опустились до 20 мм, т. е. значительно, чем все остальные на профиле.

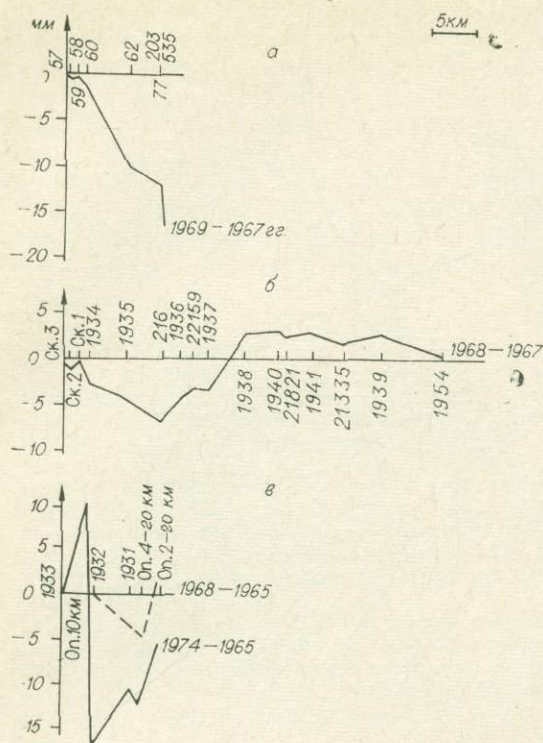


Рис. 2. Графики вертикальных движений земной поверхности приразломной зоны.

а — профиль Геок-Тепе; б — профиль Чули-Изгант; в — профиль Берзенги.

Берзенги в приразломной части зоны повторяет картину, отмеченную на двух предыдущих профилях (см. рис. 2). Сопоставление локальных вертикальных движений на профилях, расположенных в приразломной зоне, с сейсмичностью 1968—1969 гг. приводит к мысли, что в период подготовки землетрясения реперы приразломной зоны испытывают погружение.

В последнее время лабораториями сейсмотектоники ИФЗиА АН ТССР и тектонофизики ИФЗ АН СССР проведено физическое моделирование перераспределения исходного однородного поля тектонических напряжений на неоднородностях типа разломов Ашхабадского сейсмоактивного района. Тектоническую основу моделей составили системы разломов земной коры и осадочной толщи. Основным тектоническим элементом данных систем является Передовой глубинный разлом Копетдага. Зона этого разлома состоит из серии кулис различной длины, причем юго-восточные кулисы последовательно смещены к северо-востоку. Амплитуда вертикального смещения по Передовому разлому достигает 6 км. Прямолинейные участки разлома северо-западного простирания имеют вертикальную плоскость и правосдвиговую характеристику смещений. Разломы, соединяющие кулисы, имеют широтное простирание и характеризуются развитием надвиговых структур.

Подобное сочетание этих участков позволяет считать геоструктуру от Келятинского надвига до Гяурсадагского аналогом прямолинейного разлома конечной длины. Действительно, анализ локальных аномалий поля напряжений в его окрестностях в общих чертах подтверждает это предположение. Участки надвиговых структур можно уподобить упорам, где в силу того обстоятельства, что региональное поле напряжений практически нормально плоскости разлома, горизонтальные смещения запрещены. Они возможны в том случае, когда напряжения на концах

В 1974 г. ход от Бахар-дока до Ашхабада был повторен. Результаты нивелирования подтвердили установленные ранее закономерности. Для изучения локальных особенностей вертикальных движений земной коры в зоне Передового глубинного разлома (см. рис. 1) были заложены реперы и проведено повторное нивелирование 1-го класса на профилях Геок-Тепе, Чули-Изгант и Берзенги. Результаты повторного нивелирования на профиле Геок-Тепе показали, что реперы, заложенные в прогибе, за 1967—1969 гг. опустились относительно горной части до 16 мм (рис. 2).

На профиле Чули-Изгант изменение отметок реперов за 1967—1968 гг. в приразломной зоне носит тот же характер, что и на профиле Геок-Тепе, а реперы, расположенные на Изгантской структуре, поднялись до 4 мм. Профиль Бер-

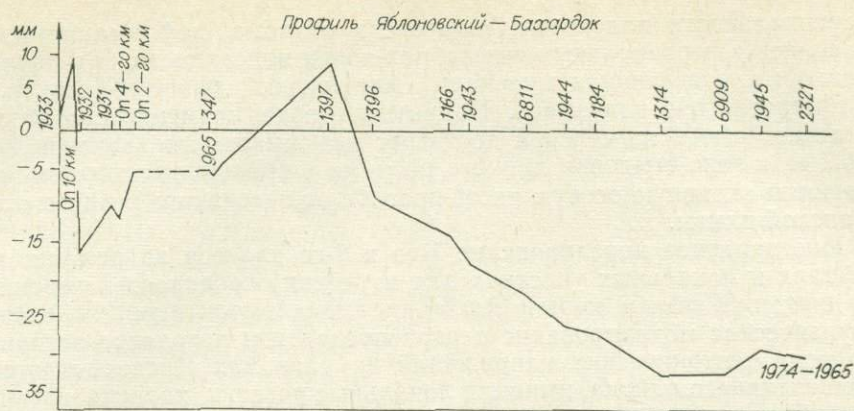


Рис. 3. График вертикальных движений земной поверхности по профилю Берзengi — Ашхабад-Бахардок.

прямолинейного участка превысят силы сцепления. Такое событие должно происходить скачком и может рассматриваться как землетрясение. В этом случае система из двух упоров и прямолинейного участка может служить моделью очагов Ашхабадского землетрясения.

С этой точки зрения представляют интерес данные повторных нивелировок по трем профилям, пересекающим выбранную структуру в местах с различной степенью искажения исходного поля напряжений. Так, профиль на рис. 2, *a* пересекает прямолинейный участок близко к его середине, где снятие напряжений максимально и возможны наибольшие горизонтальные смещения крыльев разлома. Далее на юго-восток зона сжатия напряжений должна становиться все уже и уже. Профиль на рис. 3, как наиболее протяженный, показывает, что существует региональный фон вертикальных движений, связанных с одновременным разнонаправленным развитием горной системы Копетдага и прогиба. На фоне опускания прогиба приразломная зона выражается узкой зоной, но с интенсивным прогибанием.

В районе юго-восточного окончания прямолинейного участка разлома геологическим картированием прослежена серия оперяющих разрывов с правосдвиговой характеристикой. Как показали результаты физического моделирования, тупым углом сочленения оперяющих разломов соответствуют локальные зоны максимальных вертикальных движений. Зонам развития надвиговых структур в общем плане также присущи вертикальные движения. Но в этом случае анализ материалов сильно затруднен в силу высокой степени дислоцированности осадочного чехла. Кроме того, пересечения этих зон должны быть наиболее полными, что практически невозможно из-за сильно пересеченного рельефа.

На основе результатов моделирования и геодезических материалов представляет интерес рассмотрение механизма очага землетрясения 1948 г. В результате активизации прямолинейного участка разлома на территории, примыкающей с севера к Гяурсдагской ступени, развились максимальные касательные напряжения. Площадь этой аномалии перекрывает поперечные разломы фундамента осевой части Предкопетдагского прогиба. Эти разломы определили эшелонированное распределение блоков фундамента.

Вскрытие разлома Гяурсдагской ступени произошло за счет жесткого смещения к северо-востоку блоков осевой части прогиба в тот момент, когда на юго-восточном конце прямолинейного участка накопились достаточные напряжения. Эта территория находилась под действием сил сжатия, ориентированных вдоль оси прогиба, поэтому из-за

невертикальности плоскости Аннауского разлома, деформация блоков отразилась в вертикальных смещениях точек поверхности. В результате территория, отвечающая проекции Аннауского разлома, опустилась, а Безмеинского — поднялась. Поднятие в зоне Безмеинского разлома возрастает с юга на север и достигает максимального значения, равного 1 м, в зоне стыковки данного разлома с продольным разломом, отделяющим активную осевую часть прогиба от пассивного южного склона Туранской плиты.

Многократное нивелирование 1-го и 2-го классов на региональных профилях и локальных участках для изучения особенностей вертикальных движений земной коры в Ашхабадской сейсмоактивной зоне, а также физическое моделирование перераспределения исходного регионального поля тектонических напряжений на разломах Предкопетдагского сейсмоактивного района, выявили локальные участки, характеризующиеся значительными, по отношению к остальной территории, вертикальными движениями земной поверхности, которые можно рассматривать как индикаторы тектонических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курбанов М. К., Челпанов С. С. Некоторые результаты повторного нивелирования на Ашхабадском геофизическом полигоне. — В кн.: Изучение современных движений земной коры на стационарных геофизических полигонах. Ашхабад, «Ылым», 1970.
2. Мещерский И. Н. Многократные повторные нивелирования по трассе Красноводск — Чарджоу. — В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 4. М., ВИНТИ, 1968.

В. И. Лыков, А. И. Старченко, Э. Л. Шиханович

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ РЕПЕРОВ В ЗОНЕ ОЧАГОВ АШХАБАДСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Тектонической основой очагов сильнейших землетрясений Туркмении является Передовой глубинный разлом Копетдага. Он может быть уподоблен линейной дислокацией, концы которой определены структурами Большого Балхана и Гяурсдага. Именно этим структурам свой-

ственны аномально высокие касательные напряжения, приводящие к повышенной вероятности возникновения тектонических движений. Линейный размер очаговых зон Ашхабадских землетрясений соответствует протяженности прямолинейного участка Передового разлома от Гяурсдага до Келятинской гряды. Обе названные структуры — это структуры надвигания пород Копетдага на породы прогиба. Прямолинейному участку сдвиговых перемещения, выявленные геологической съемкой при карти-

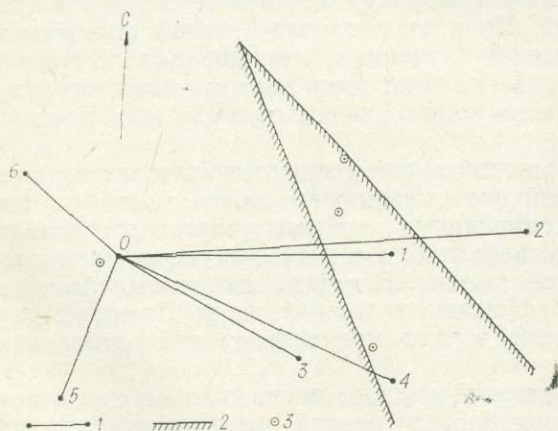


Рис. 1. Схема расположения геодезических реперов. 1 — измеряемые линии; 2 — разломы; 3 — глубинные скважины; О — место установки светодальномера.

ровании диагональных оперяющих разрывов осадочного чехла Копетдага. Концам прямолинейного участка свойственны следы интенсивных деформационных процессов (сильная дислоцированность осадочного чехла, опрокидывание складок, надвигание и т. д.). В районе юго-восточного конца прямолинейного участка Передового разлома создана система реперов для изучения перемещения их в горизонтальной плоскости, вызванных деформационными процессами (рис. 1). На рис. 2 изображен репер, представляющий собой четырехгранную металлическую ферму, сваренную из уголкового стали 75×75 мм, длиной 3,4 м.

Длины радиальных баз не превышают 3500 м. Четыре репера расположены попарно по разные стороны от разломов осадочного чехла, мощность которого по геофизическим данным оценивается в 8 км. Разломы закартированы геологической съемкой и их плоскости определены по данным глубинного разведочного бурения.

Регулярные замеры начаты в мае 1974 г. В интервале с мая по август максимальные отклонения от стабильного значения длины составляли ± 3 мм. Перед 4-балльным землетрясением 5 августа за 6 ч было зафиксировано изменение длины базы на 19 мм. В настоящем сообщении мы хотим остановиться на описании событий, начавшихся 28 ноября 1974 г. Ход изменения длины одной из наиболее детально промерявшихся баз приведен на рис. 3. Начиная с этого события, частота замеров была доведена до предельно возможной. Как видно из графика, в течение иллюстрируемого интервала фиксировалось переменное во времени укорочение длины базы. Максимальные значения приращений достигали -10 см, а скорость -5 мм/мин при погрешности измерений ± 3 мм. В следующие сутки знак приращения сменился, и в дальнейшем изменение длины базы стало знакопеременным. Возмущение затухло 5 декабря, а 12 декабря началось вновь и не прекращалось до мая 1975 г. Форма графика на определенных этапах напоминает вид кривых нагружения и релаксации из теории упругости.

Основные черты развития этого процесса таковы: 1. Амплитуда приращений достигла максимума (± 20 см) 30 января. 2. В этот же момент скорость деформации тоже была максимальной: 50 мм/мин. 3. После 30 января периоды устойчивого сжатия и растяжения начали увеличиваться и достигли 5—6 сут. 4. Максимальные значения деформа-

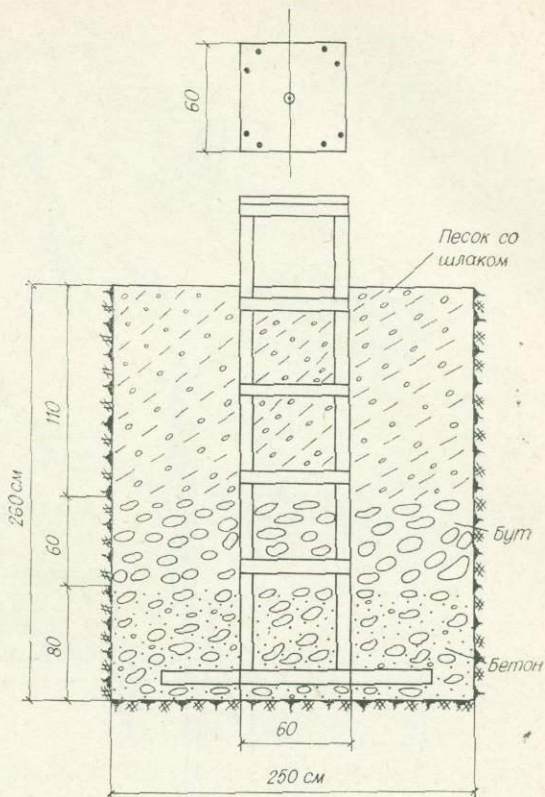


Рис. 2. Наблюдательный пункт (продольный разрез).

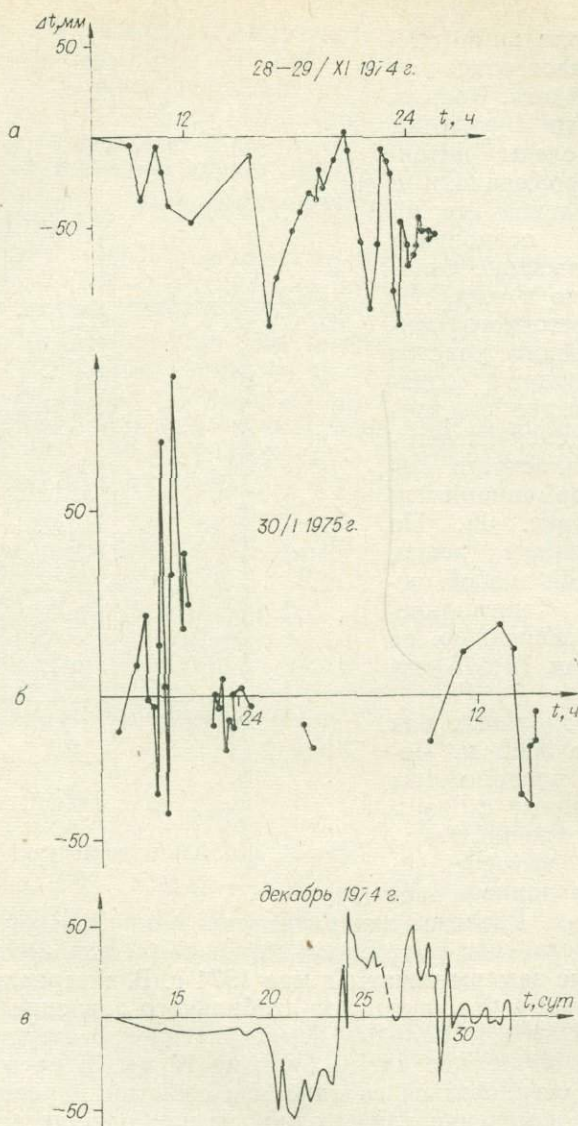
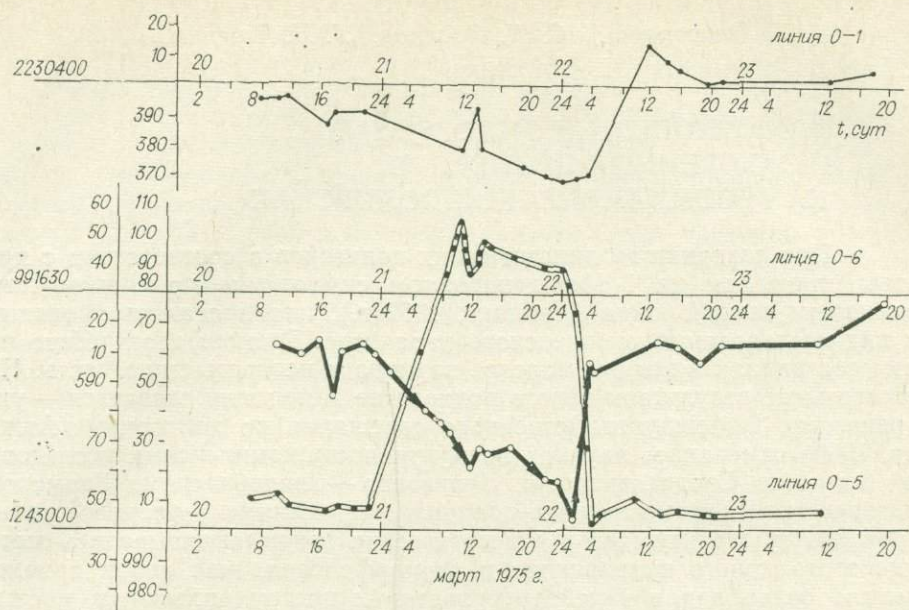


Рис. 3. Виды деформационных процессов (линия 0—1).

ции уменьшились до $2 \cdot 10^{-5}$. 5. Деформационные процессы наблюдаются по всем базам, даже по тем, реперы которых находятся в одном блоке (рис. 4). 6. Деформации в монолитном блоке 20 марта достигли значений $8 \cdot 10^{-5}$, после чего по одному из разломов произошло смещение крыльев, которое регистрируется до сих пор. Амплитуда смещения 7 см (рис. 5). 7. С ноября сейсмический фон на площади радиусом в 35 км снизился практически до нуля. 8. Результаты анализа совокупности графиков по всем базам позволяют утверждать, что тектонические деформации в приразломных зонах имеют волновой характер. Скорости их распространения 1 мм/с. Ввиду того, что расстояние между реперами одного блока такое же, как между реперами, расположенными по разные стороны от разлома, в настоящее время делается попытка привлечь данные измерения длинных озер. Кроме того, создается систе-



ма реперов в середине прямолинейного участка глубинного разлома с целью определения смещения крыльев. Результаты физического и математического моделирования показывают, что подвижки крыльев здесь должны быть максимальными. Наблюдения на этом кусте реперов помогут ответить на вопрос, являются ли деформационные процессы, регистрируемые в окрестностях г. Ашхабада, следствием активизации Передового разлома или только оперяющих его разрывов осадочного чехла?

Н. С. Благоволин, С. К. Горелов, Г. Н. Пшенин,
В. А. Филькин, Е. А. Финько

О СООТНОШЕНИИ ЭНДОГЕННЫХ И ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ

При создании геодинамических полигонов в соответствии с проектом, принятым на I Международном симпозиуме по современным движениям земной коры (Лейпциг, 1962 г.), планировалось проводить на них исследования комплексного характера. Геоморфологические работы составляли в этом комплексе важную и неотъемлемую часть. Положительные результаты такого подхода не замедлили сказаться — уже в решениях I Междудеятельностного совещания по полигонам (Ашхабад, 1969) отмечалась научная продуктивность комплексных исследований на ряде Среднеазиатских полигонов — Ашхабадском, Гармском, Талгарском. В процессе исследований на полигонах, расположенных в различных структурных и климатических зонах, складывалась методика этого нового направления в геоморфологии, шел поиск приемов анализа рельефа для целей интерпретации инструментальных, прежде всего геодезических данных [1].

На Крымском, Ашхабадском, Баскунчакском, Гармском, Ташкентском полигонах были поставлены работы по изучению интенсивности современных экзогенных процессов с применением различных инструментальных методов. Теоретической основой работ было положение о том, что рельеф формируется при непрерывном взаимодействии эндогенных и экзогенных сил; следовательно, при интерпретации данных о современных тектонических процессах необходимо четкое понимание их взаимоотношений с другим компонентом этой равновесной системы. В сообщении мы подводим первые итоги работы геоморфологов Института географии АН СССР в данном направлении.

Практически на всех действующих полигонах выявлена неравномерность скоростей современных движений земной поверхности в пространстве, а в последние годы многократными измерениями установлена неравномерность движений и во времени. Так, например, на Крымском полигоне по результатам повторного нивелирования на линии Ялта — Сирень — Симферополь с интервалом около двух лет (I. 1965—IX. 1966 гг.) скорость вертикальных движений пункта Симферополь составила — 10 мм/год; по результатам нивелирования 1965—1969 гг. около — 6 мм/год, а по данным нивелирования линии Севастополь — Симферополь 1945—1969 гг. всего — 0.4 мм/год. Неравномерность движений выявляется и при анализе показаний уровенных пунктов Черного моря: футштоки в Севастополе, Херсоне и других пунктах почти за 100-летний период обнаруживают изменение не только скорости, но и знака вертикальных движений побережий [2]. На Баскунчакском полигоне, созданном в 1951 г., повторными нивелированиями установлено, что соленосные положительные структуры испытывают современное поднятие с переменной скоростью, например, репер 4 в течение 1951—1958 гг. имел скорость — 0,8 мм/год, а в 1958—1966 гг. +4,0 мм/год [7]. Особенно ярко проявилась неравномерность вертикальных смещений поверхности во времени на полигонах с многократными (до 10 раз в год) повторениями, например, на Гармском полигоне [7].

Подобная нестационарность этого явления во времени связана с тем, что современные движения обусловлены очень многими факторами разного происхождения (эндогенного, экзогенного, антропогенного, а кроме того, инструментальными погрешностями). И именно на полигонах при комплексном подходе к изучению современных движений появ-

ляется возможность расчленить их суммарный эффект, зафиксированный в инструментальных данных, на разные генетические составляющие. Значение взаимоотношений современных эндогенных и экзогенных процессов имеет здесь первостепенное значение.

Первые результаты изучения экзогенных процессов на полигонах различными инструментальными методами показали, что в данном случае мы имеем дело с явлениями крайне неравномерными по своей интенсивности во времени. На *Крымском полигоне* наиболее показательные результаты в этом отношении получены при изучении обвально-оползневых процессов на склоне г. Демерджи (в 8 км к северо-востоку от Алушты). Этот объект расположен в зоне активного Салгирско-Октябрьского разлома, вблизи линии повторного нивелирования Симферополь — Алушта. Повторные наземные стереофотограмметрические съемки (НСС) позволили выявить периоды крупных обвалов и резкого преобладания сноса над аккумуляцией, подсчитано, например, что в период 1965—1967 гг. только из фиксированной съемкой зоны денудации удалено 6 тыс. м³ породы (средний снесенный слой 1,6 м). В более «спокойные» периоды (1967—1969 гг.), когда крупные обвалы отсутствуют, происходит перераспределение материала по склону и, хотя зона денудации занимает прежнюю площадь, средняя мощность снесенного слоя за тот же временной интервал уменьшается до 1,0 м.

Трудно наметить прямые связи между этими процессами и современными движениями земной поверхности¹. Весьма вероятно, что динамика обвально-оползневых процессов в рассматриваемом районе обусловлена не столько медленными, сколько быстрыми (сейсмическими) движениями. Возможно, что землетрясения и активизация обвально-оползневых процессов на склонах несколько разъединены во времени: год крупного обвала Демерджи был в сейсмическом отношении «спокойным», зато в предыдущем 1965 г. произошло восемь толчков с эпицентрами в море вблизи Алушты с $K=6-9$. Можно предположить, что именно эти землетрясения и подготовили условия для активизации обвалов и оползней 1966 г.

На *Ташкентском полигоне* обнаружена неравномерность во времени развития оползней на трех учетных площадках. При этом намечаются интересные связи между оползнями, современными вертикальными движениями (по данным повторного нивелирования), климатическими особенностями и сейсмичностью. Ход современных вертикальных движений на Ташкентском полигоне за 1965—1971 гг. характеризуется осредненным графиком, построенным по данным шести реперов [4]. С ним были сопоставлены результаты наблюдений за оползнями, проводившихся с 1966 по 1972 г. на трех площадках, расположенных к востоку от Ташкента, на горной гряде Сюрень — Ата-Алом — левом водоразделе р. Чирчик (рис. 1). Все площадки расположены на склонах общей северо-западной и запад-северо-западной экспозиций крутизной от 18 до 27°, в однородных геолого-геоморфологических условиях. На всех площадках ежегодно в июне производился подсчет новообразований оползневого характера (см. рис. 1).

Совпадение графика средних величин современных вертикальных движений на Ташкентском полигоне и динамики оползней за один и тот же промежуток времени позволяет сделать ряд выводов.

1. Бесспорна прямая зависимость активности образования оползней от количества осадков: пик графика оползнеобразования приходится на 1969 г., знаменитый тем, что за его зимне-весенний период в горах Средней Азии выпало в 2,5—3 раза больше среднегодовой нормы осадков. 2. Неполное совпадение графиков сейсмической активности и динамики оползнеобразования [5] может быть объяснено тем, что за

¹ В специальной литературе этот термин обычно отождествляется с современными тектоническими движениями земной коры.

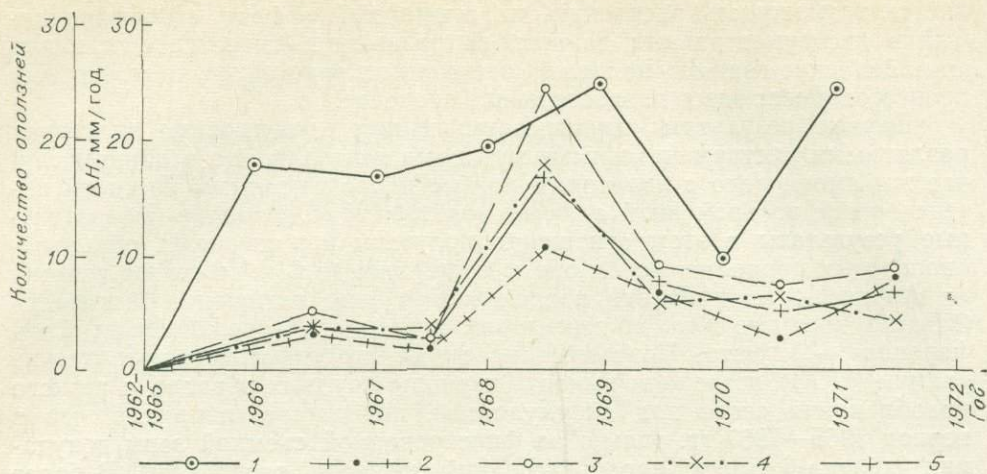


Рис. 1. График средних годовых вертикальных поднятий территории г. Ташкента и прироста оползней по трем учетным площадкам к востоку от Ташкента.

1 — усредненный график современных вертикальных движений территории Ташкента по шести реперам [4]; 2—4 — графики прироста оползней по первой (2), второй (3) и третьей (4) учетным площадкам (соответственно: Сюрень-Ата, Северный Алом, Средний Алом), 5 — усредненный график прироста оползней по трем учетным площадкам.

«тектоническую подготовку» оползней ответственны и медленные и быстрые (сейсмические) движения при перевесе последних. З. Совпадение времени с экстремально высокой суммой осадков и пика поднятий на графике современных вертикальных движений определенно указывает на то, что «современные тектонические движения» представляют сложную многокомпонентную систему, в которой большую, еще недостаточно учитываемую роль играет динамика грунтов.

На Гармском полигоне использование данных разновременных аэрофотосъемок и фототеодолитных съемок дало возможность получить количественные показатели интенсивности гравитационных и эрозионных процессов в пределах интенсивно поднимающегося в позднем плейстоцене и голоцене Чорчорогского блока и аккумуляции на конусе выноса, приуроченном к Сурхобской долине. Стереофотограмметрическая обработка аэрофотосъемок и наземных съемок разных лет, составление детальных планов и последующие вычисления на них по методу детальной сетки позволили определить средний снесенный слой на склонах оврагов, расчленяющих Чорчорогский блок, в $7 \div 7,5$ м для 20-летнего интервала при предельной ошибке около ± 1 м (рис. 2). В пересчете на среднегодовые величины это составляет снос около 0,4 м/год (при ошибке $\pm 0,02$ м). По многолетним (1957—1974 гг.) геодезическим измерениям на Гармском полигоне средняя скорость поднятия Чорчорогского блока не превышает 15 мм/год. Таким образом, скорости эрозионных процессов здесь на целый порядок выше скоростей, отражающих в данном районе тенденции тектонического развития морфоструктур. Последние были установлены геоморфологическими исследованиями по совокупности признаков, в том числе по активности проявления эрозионных процессов [7]. Та же закономерность отмечается и для аккумулятивных процессов. Средний слой аккумуляции на конусе выноса, где проходит нивелирный ход Гармского полигона, за 20 лет составляет $+4,4$ м при ошибке ± 2 м. Среднегодовая скорость аккумуляции ($+0,22$ м) на порядок превышает здесь среднегодовые скорости, фиксированные повторным нивелированием: $-1,2$ мм/год для репера 3481, $+2$ мм/год — репера 3184, $+2,1$ мм/год — репера 2413.

Сопоставление интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на Гармском полигоне для разных временных интервалов —

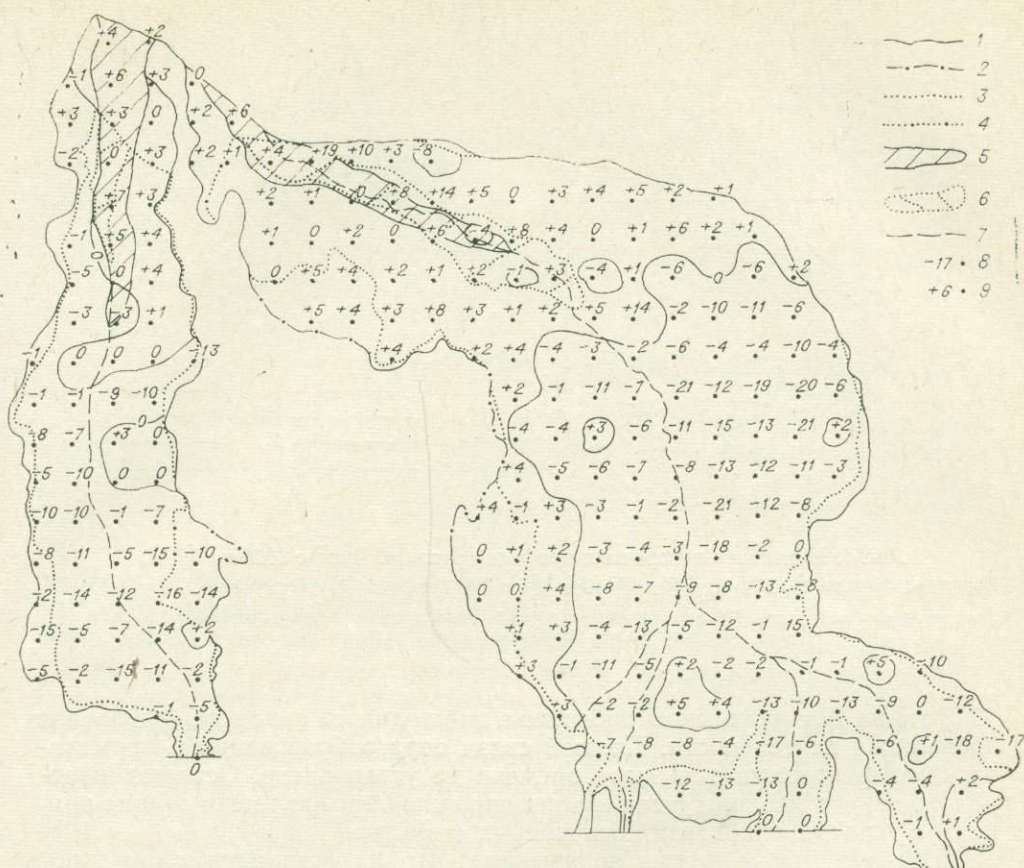


Рис. 2. Распределение зон денудации и аккумуляции в пределах оврагов, расчленяющих Чорчорогский блок (Гармский полигон).

1—3 — бровка оврагов по данным АФС (1 — 1969 г., четко выраж., 2 — нечетко выраж., 3 — 1949 г., четко выраж., 4 — нечетко выраж.), 5 — дно оврага по АФС 1969 г. и 6 — 1949 г.; 7 — главные водотоки; 8 — средняя толщина слоя денудации и 9 — слоя аккумуляции за 20 лет (1949—1969 гг.).

20-летнего (1949—1969) и 2-летнего (1967—1969) показало неравномерность проявления этих процессов во времени: более 50% материала было вынесено со склонов оврагов и отложилось на конусе выноса и в пределах днища оврага за период 1967—1969 гг., в который включалась аномально многоснежная зима 1968—1969 гг. Именно климатическими аномалиями мы объясняем для рассматриваемого отрезка времени пик активизации эрозивно-аккумулятивных процессов на Гармском полигоне. Большинство реперов Гармского полигона, как скальных, так и грунтовых, для июньской нивелировки 1969 г. на графиках образуют пик вниз [7], отражая, таким образом, зеркальную связь.

Геоморфологические исследования ИГАН СССР, проводимые на Баскунчакском полигоне с 1961 г., выявили неравномерность во времени процессов оврагообразования. Наибольшие скорости роста оврагов отмечались в 1962—1963 гг., когда все реперы полигона испытывали наибольший подъем. Рост оврагов этого года в несколько раз превышал скорости предыдущих и последующих лет. Особенно велик был линейный прирост оврагов на поднимающихся структурах (до 3—4 м/год). В районах относительного опускания, в пределах отрицательных структур в это время, также ощущался заметный прирост оврагов (до 10—17 см/год). Повторные нивелирования на Баскунчакском полигоне не производились с 1968 г., а наблюдения над экзогенными процессами продолжались. Интересно отметить, что ровно через 10 лет — в 1972—

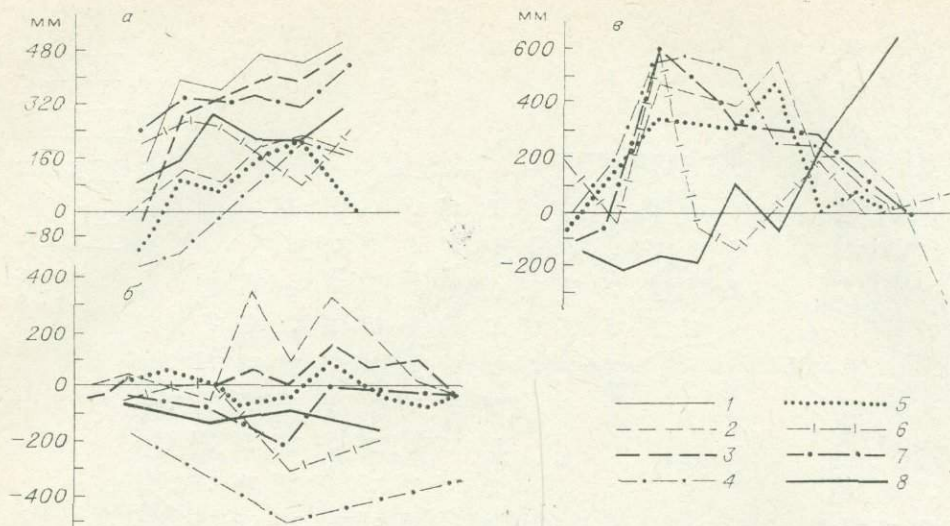


Рис. 3. Изменение поперечных профилей русла р. Чули с 1966 по 1972 г.

Периоды наблюдений, гг.: 1 — 1966—1967, 2 — 1966—1968, 3 — 1966—1969, 4 — 1966—1970, 5 — 1966—1970, 6 — 1966—1971, 7 — 1966—1971, 8 — 1966—1972.

Участок русла в краевом Предкопетдагском прогибе (а); в своде Маркусской антиклинали (б); и в пределах Ванновской синклинали (в).

1973 гг. на Баскунчакском побережье наблюдалось такое же оживление эрозийной деятельности. Прямой связи оврагообразования с климатическими факторами для этого времени не установлено. Остается предположить, что периоды активизации овражной эрозии имеют общие причины с усилением поднятий соленосных структур.

Приведенные примеры показывают, что на всех исследуемых полигонах величины экзогенных процессов на порядок больше тех скоростей, которые выявлены повторным нивелированием, а характер проявления отражает сложное взаимодействие тектонических, климатических и других факторов. Связь современных экзогенных процессов с современными движениями, установленными по данным нивелирования, далеко не простая. В настоящее время наиболее полно она изучена на *Ашхабадском полигоне*, где в течение девяти лет проводятся систематические повторные наблюдения за развитием современных русловых процессов и вертикальными перемещениями земной поверхности на поперечных и продольных профилях рек, расположенных в различных структурных условиях северного склона Копетдага. Частота наблюдений на отдельных участках долин рек Чули и Секиз-Яб, пересекающих вкрест простирания все крупные складки Копетдага и линию его Главного надвига на краевой прогиб, в отдельные периоды составляла 3—4 раза в год. Точность наблюдений за изменениями высот земной поверхности (повторное нивелирование) составляет десятые доли миллиметра, а наблюдений за русловыми процессами — первые сантиметры.

Результаты измерений и сопоставления данных позволяют сделать следующие основные выводы. Достаточно четко определился неравномерный во времени характер развития современных русловых процессов в пределах всего северного склона Копетдага. Это выражается в замещении процессов глубинной эрозии рек процессами аккумуляции руслового аллювия и наоборот на одних и тех же участках речных долин (рис. 3). Вместе с тем на участках антиклиналей преобладал процесс врезания речных русел; в синклиналях — аккумуляции наносов при максимальном суммарном врезе до 40—50 см и накоплении избытка мощности аллювия до 60 см за период с 1966 по 1972 г.

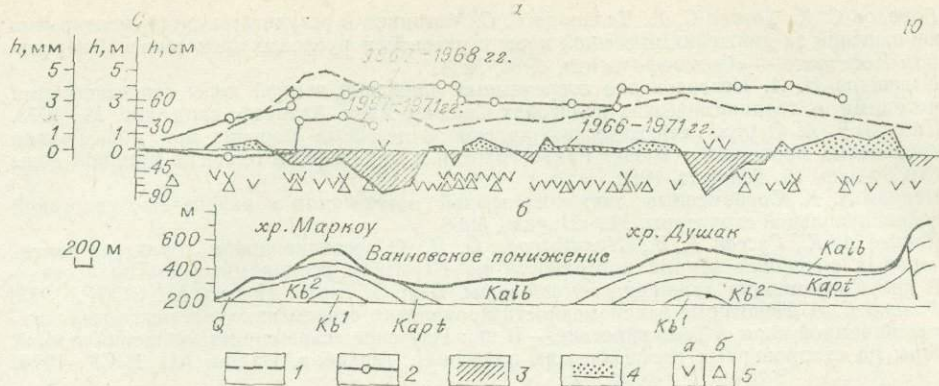


Рис. 4. Комплексный профиль долины р. Чули в среднем и нижнем течении.

а — профиль долины; б — схематический морфоструктурный профиль вдоль левобережья р. Чули. 1 — кривая амплитуд позднеголоценовых движений, м; 2 — кривые изменения высот земной поверхности на линии повторного нивелирования, мм; 3 — кривая эрозионно-аккумулятивных изменений профиля русла, см; 4 — участки преобладающего врезания и 5 — преобладающей аккумуляции русловых отложений; 6 — пункты наблюдений (а — геодезические реперы, б — створы русла).

Одновременно наметилась прямая или близкая к ней связь указанных выше общих тенденций развития руслового процесса с современными вертикальными перемещениями земной поверхности. Примером может служить комплексный продольный профиль долины р. Чули. В процессе обработки результатов наблюдений и составления этого профиля было установлено, что участки относительного поднятия земной поверхности, выявленные по данным высокоточных повторных нивелирований, в общих чертах совпали с участками активного современного врезания речных русел на склонах и присводовых участках антиклинальных структур, установленных путем неоднократных технических нивелирований поперечников русел. В синклинальных понижениях, испытавших относительное опускание, ведущая роль в развитии русловых процессов принадлежала процессам аккумуляции (рис. 4).

Таким образом, был сделан вывод о влиянии современных движений антиклинальных и синклинальных структур на развитие русловых процессов в рассматриваемом районе Копетдага [3]. Скорости этих процессов оказались существенно различными — порядка 1—2 мм/год для вертикальных движений структур и 10—15 см/год — для эрозионно-аккумулятивных процессов. Однако закономерную связь между ними — по одной и той же общей направленности процессов в пределах единой геологической структуры и особенностям их внутренней динамики (неоднократной и кратковременной изменчивости знака) — следует считать установленной.

Итак, несмотря на количественную несоразмерность эндо- и экзогенных процессов, последние, приуроченные к определенным морфоструктурам, отражают тенденции современного тектонического развития этих морфоструктур. Тем самым геоморфологические исследования помогают осмысливать геодезические графики, выделять из них собственно тектоническую составляющую.

ЛИТЕРАТУРА

1. Благоволин Н. С., Горелов С. К., Лилиенберг Д. А., Финько Е. А. Методика геоморфологических исследований современных движений на комплексных геодинамических полигонах. — В кн.: Проблемы современных движений земной коры. Таллин, «Валгус», 1975.
2. Благоволин Н. С., Победоносцев С. В. Современные вертикальные движения берегов Черного и Азовского морей. — «Геоморфология», 1973, № 3.

3. Горелов С. К., Тагиев С. Т., Челпанов С. С. Методика и результаты инструментальных наблюдений за движениями земной коры и развитием русловых процессов в Центральном Копетдаге. — «Геоморфология», 1973, № 4.
4. Корешков Н. А. Исследование современных движений земной коры геодезическими методами на геодинамических полигонах Средней Азии. Автореф. канд. дис. М., 1973.
5. Ниязов Р. А. О роли сейсмических явлений в лессовых породах при образовании оползневых процессов. — В кн.: Гидрогеология и инженерная геология аридной зоны СССР. Вып. 10. Ташкент, 1969.
6. Певнев А. К. Современные движения земной поверхности в районе Баскунчакской солянокупольной структуры. М., «Наука», 1968.
7. Певнев А. К., Гусева Т. В., Никифорова О. Д. О нестационарном характере вертикальных смещений земной поверхности на Гармском геодинамическом полигоне. — В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
8. Финько Е. А. Некоторые закономерности проявления современных вертикальных движений земной коры в Таджикистане. — В кн.: Изучение современных движений земной коры на стационарных геофизических полигонах. Ашхабад, Изд-во АН ТССР, 1970.

А. А. Никонов

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ПО РАЗЛОМАМ СРЕДНЕЙ АЗИИ И ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Изучению горизонтальной составляющей движений в Средней Азии до сих пор уделялось неоправданно мало внимания. Это особенно относится к движениям четвертичного периода и современным. К настоящему времени имеются лишь отрывочные, иногда случайные наблюдения над горизонтальными смещениями.

Повышенный интерес к горизонтальным движениям вообще и постановка на нескольких полигонах Средней Азии специальных инструментальных измерений горизонтальной составляющей движений делают весьма актуальной попытку собрать воедино даже немногочисленные, главным образом, геолого-геоморфологические данные о них. Наиболее важным автор считает:

1) отразить на карте известные проявления горизонтальных движений последнего столетия, голоцена, позднего и частично среднего плейстоцена (в пределах последних 100—200 тыс. лет); 2) количественно оценить величины и скорости горизонтальной составляющей смещений в рассматриваемые отрезки времени; 3) определить характер и количественные показатели изменений скорости горизонтальных движений во времени.

С целью более полной и дифференцированной характеристики движений мы рассматриваем отдельно движения по надвигам и сдвигам (с преимущественно или существенно надвиговой и сдвиговой составляющими соответственно) и движения медленные и быстрые. Для позднего плейстоцена и более раннего времени быстрые и медленные движения разделять не удастся, поэтому их величины и скорости оцениваются суммарно.

Почерпнутый из литературы и собранный автором фактический материал по горизонтальным движениям относится к отдельным участкам крупных зон разломов, таких, как надвиги Вахшский в Таджикистане, Карасуйский в восточной Фергане, Чон-Курчакский в северной Киргизии; сдвиги — Дарваз-Каракульский в Дарвазе, Таласо-Ферганский в Центральном Тянь-Шане, Джунгарский, а также к участкам более мелких разломов (рис. 1).

Приведем несколько примеров.

В Северном Тянь-Шане у северного подножия Киргизского хребта известно несколько надвигов. Нами изучен надвиг в зоне Иссык-атинского разлома у с. Юрьевка. На правом берегу р. Иссык-ата в тыловой

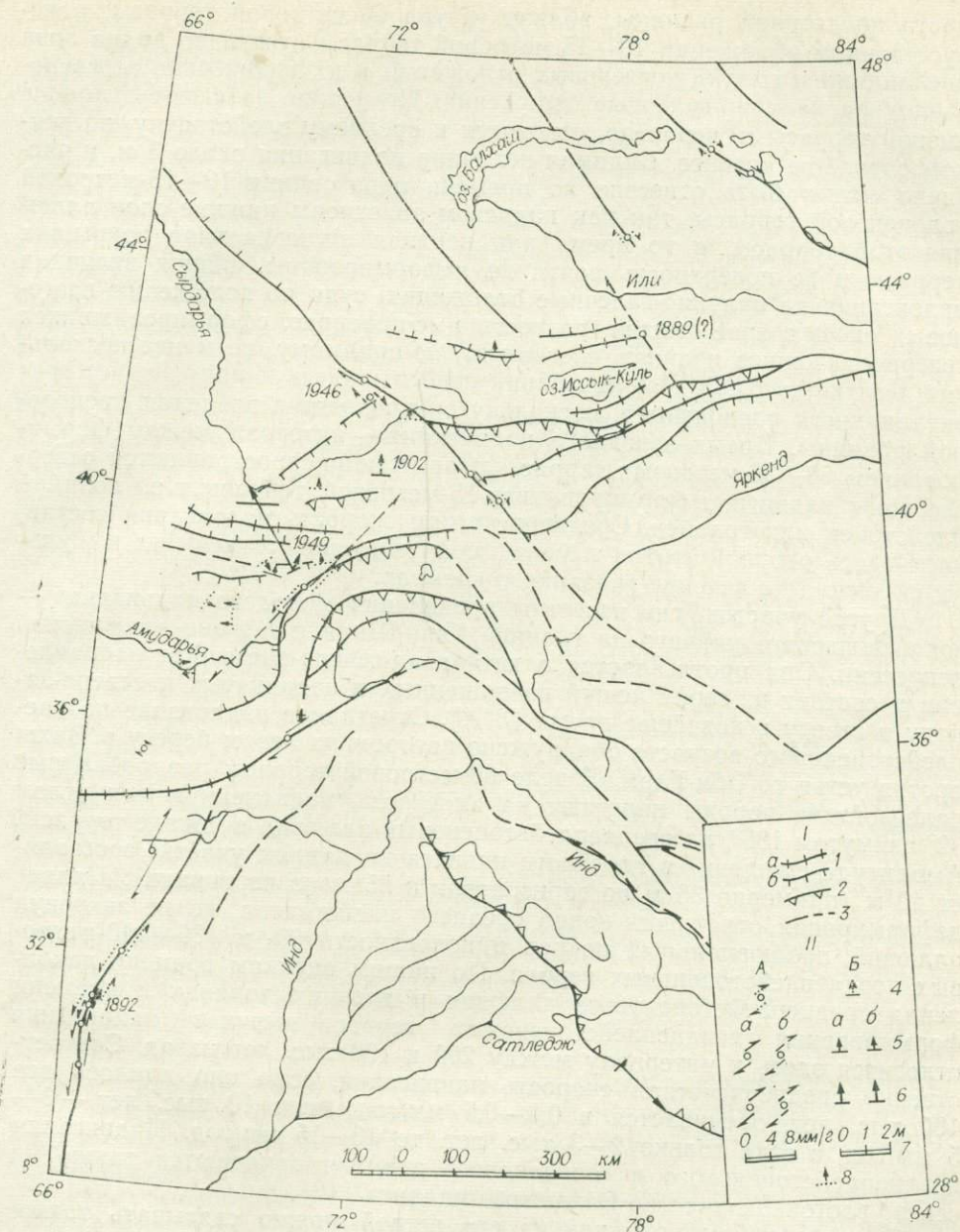


Рис. 1. Схема современных голоценовых и позднеплейстоценовых горизонтальных смещений по разломам.

Составил А. А. Никонов с использованием данных В. С. Буртмана, В. С. Войтовича, С. А. Захарова, И. М. Конопальцева, К. В. Курдюкова, А. А. Никонова, Г. Н. Пшенина, Е. Я. Ранцмана, В. М. Реймана, С. Ф. Скобелева, А. И. Суворова, Н. М. Чабдарова, Н. W. Wellman, Н. Sinvaal и др.

I — главные зоны разломов в земной коре, активные в новейшее время (по Тектонической карте Евразии, м-ба 1 : 5 000 000, М., 1966, с дополнениями), в том числе с движениями по ним преимущественно или существенно: 1 — вертикальными (а — взбросовыми, б — сбросовыми), 2 — надвиговыми, 3 — сдвиговыми.

II — молодые смещения по разломам: А — сдвиговые, Б — надвиговые. 4 — позднеплейстоценовые; 5 — голоценовые: а — медленные, б — быстрые (при землетрясениях); 6 — современные: а — медленные, б — подвижки при землетрясениях (цифры сбоку — год возникновения); 7 — векторный масштаб смещений: А — скорость медленных смещений и суммарная, Б — величина смещения при землетрясениях; 8 — смещения показаны внемасштабно.

части предгорной равнины, вблизи уступа 50-метровой террасы, в искусственном обнажении 10—15-метровой террасы отчетливо видна зона дислокаций и смятий неогеновых отложений и их надвигание к северо-западу на валунно-галечные отложения. Последние залегают в цоколе низкой террасы и, вероятно, относятся к среднему плейстоцену, во всяком случае не древнее. Видимая величина надвигания около 3 м, и частично может быть отнесена ко времени образования 10—15-метровой голоценовой террасы, так как надвигом захвачены нижние слои аллювия этой террасы, в то время как верхняя аллювиальная покрывка террасы и ее поверхность почти не деформированы. Общая величина надвигания на валунно-галечные отложения, судя по положению неогеновых слоев в зоне смятия, разности высот террас, сформировавшихся севернее и южнее надвига, составляет, по-видимому, не менее нескольких десятков метров. Нет оснований относить здесь надвиг за счет гравитационного расползания, поскольку он проходит в пределах предгорной равнины. Время основного надвигания — интервал между формированием 50—30-метровых террас, которые не распространяются севернее зоны надвига, и формированием 15-метровой террасы, т. е. поздний плейстоцен или голоцен. Среднерасчетная скорость надвигания составляла здесь около 1 мм/год и более, если допускать отдельные импульсы активности в течение указанного времени.

Другой участок, где известны проявления молодого надвигания — зона Вахского надвига на границе Тянь-Шаня и Афгано-Таджикской депрессии. Она протягивается в юго-запад-северо-восточном направлении и состоит из серии чешуй взброшенных и надвинутых к северо-западу и северу в новейшее время [3, 4]. Отчетливое надвигание позднеплейстоценового возраста обнаружено автором на левом берегу р. Вахш против устья р. Оби-Гарм. В теле 60-метровой террасы раздробленные палеозойские породы налегают на плоскость, наклоненную под углом 32° азимутом 185° , на среднеплейстоценовый аллювий в цоколе террасы. Амплитуда смещения в плоскости надвига на данном участке составляет 40 м (примерно 36 м по горизонтали и 25 м по вертикали). Надвиг деформировал отложения конца среднего плейстоцена, но не затронул аллювий, пролювиальный покров и поверхность 60- и 130—140-метровых позднеплейстоценовых террас. По нашим оценкам времени накопления среднеплейстоценового аллювия в древних долинах и времени формирования позднеплейстоценовых террас импульс надвигания относится здесь к интервалу между 200 и 100 тыс. лет назад. Соответственно среднерасчетная скорость надвигания, если оно длилось все 100 тыс. лет, оценивается в 0,3—0,5 мм/год; если 10 тыс. лет — 3—5 мм/год, а если только 2—3 тыс. лет, то 10—15 мм/год. Надвигания позднеплейстоценового и голоценового времени отмечаются также на северо-восточном участке Вахского надвига [12].

С надвиганием по одной из его ветвей можно связывать также современные горизонтальные движения, измеряемые на Гармском полигоне. Сеть триангуляции длиной несколько километров пересекает зону разлома в субмеридиональном направлении. Сравнением триангуляции 1949—1950 и 1968—1970 гг., а также 1971 и 1972 гг. установлено сближение юго-восточного и северо-западного крыльев разломов на 30—40 см, что выходит за пределы тройных ошибок [5, 6]. Среднегодовая скорость в этот период составляла 9—17 мм/год.

Отмечаются следующие особенности современных горизонтальных движений на Гармском полигоне. Во-первых, векторы смещений удаленных от разлома точек за 1948—1949 гг., т. е. в период, включающий Хаитское землетрясение ($M=7,5$, эпицентр в 60 км к северо-востоку), направлены на эпицентр в отличие от векторов долговременного смещения, ориентированных к северо-западу. Вторая особенность состоит в том, что векторы смещений на протяжении 6 км над юго-восточным

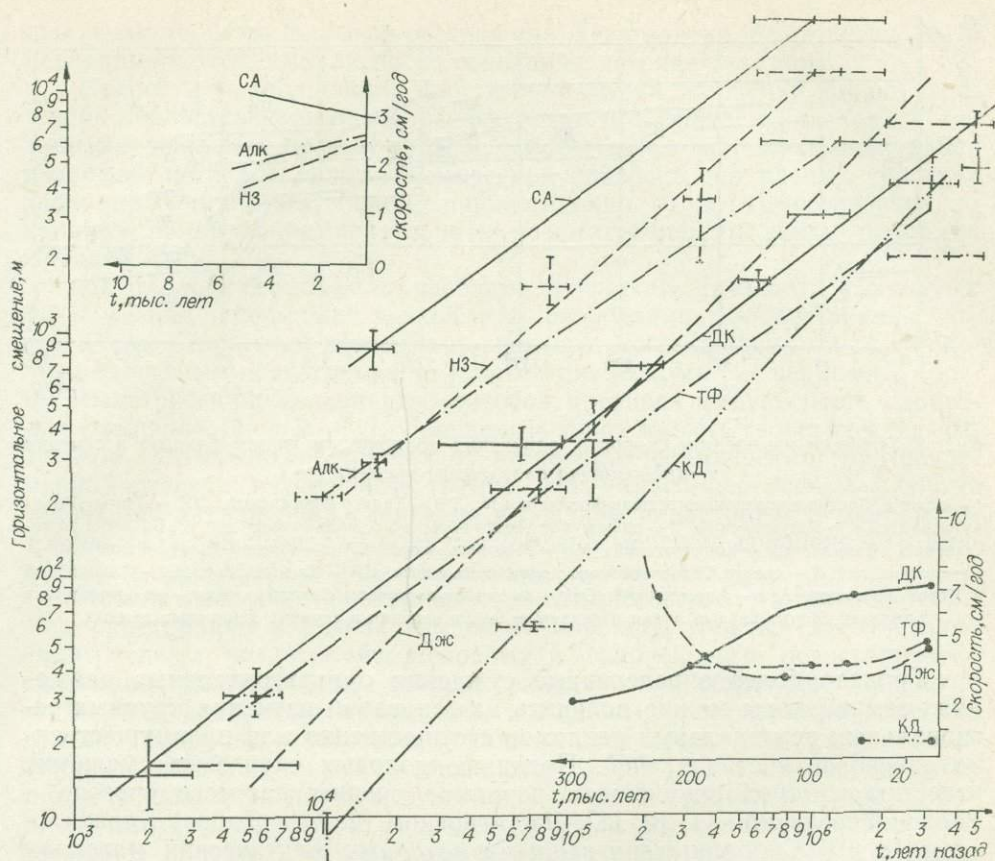


Рис. 2. Графики величины и скорости горизонтальных движений по крупным разломам в плиоцене, плейстоцене и голоцене.

Разломы Центральноазиатского подвижного пояса (жирные линии): Дарваз-Каракульский (ДК), Таласо-Ферганский (ТФ), Джунгарский (ДЖ), Копетдагский (КД).

Разломы Тихоокеанского подвижного пояса (тонкие линии): Сан-Андреас, Калифорния (СА), Аляпийский, Новая Зеландия (НЗ), Файеруэзер, Аляска (Алк).

крылом разлома лишь в небольших пределах изменяются по направлению и модулю. Это означает, что все сближение происходит в узкой полосе вдоль русла р. Сурхоб, где и протягивается активный разрыв, по-видимому, надвигового типа.

Третья особенность та, что на южном, висячем крыле разлома низко расположенные в рельефе точки сместились меньше, чем расположенные высоко, — соответственно со скоростью 13 и 17 мм/год. Это наводит на мысль, что мы имеем здесь дело с «козырьковым надвигом», плоскость которого на глубине приближается к вертикальной. Но сжимающие субмеридионально направленные усилия на глубине должны сохраняться. С этим согласуется факт выжимания вверх в зоне разломов узких клиньев в позднем плейстоцене по геолого-геоморфологическим данным и в настоящее время, судя по результатам повторного нивелирования [14].

Полученные в отдельных случаях скорости надвигания можно только ориентировочно рассматривать как горизонтальные движения земной коры по продольным тектоническим разрывам, потому что мы не знаем изменения падения рассматриваемых разрывов с глубиной, влияния гравитационного сползания и количества активных разрывов в каждой зоне.

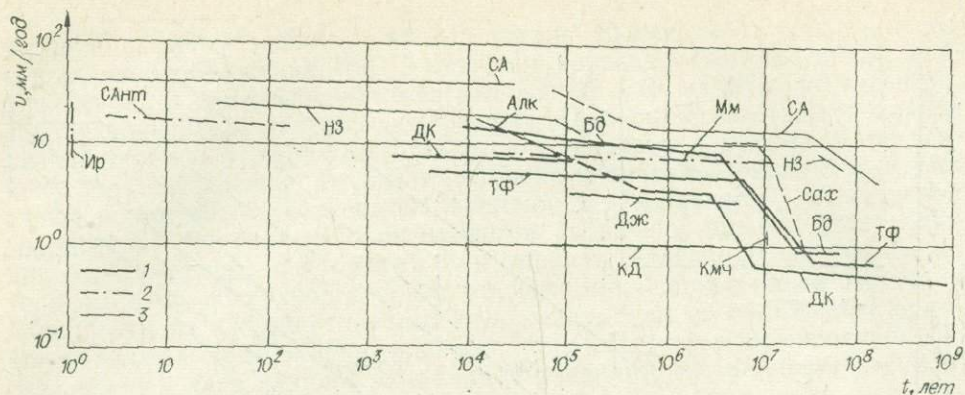


Рис. 3. Графики изменения скорости сдвига по крупным зонам сдвигов в течение кайнозоя до настоящего времени.

1 — сдвиги Центральноазиатского подвижного пояса: ТФ — Таласо-Ферганский, ДК — Дарваз-Каракульский, Дж — Джунгарский; 2 — сдвиги Средиземноморского подвижного пояса: БД — Белуджистанский (Чаман), КД — Копетдагский; Мм — Мертвого моря. САнт — Северо-Анатолийский, Ир — Североиранский; 3 — сдвиги Тихоокеанского подвижного пояса: СА — Сан-Андреас, НЗ — Альпийский в Новой Зеландии, Алк — Аляскинский, Сах — на северо-востоке Сахалине, КМЧ — на юго-востоке Камчатки. Вертикальные линии означают пределы величин в случаях одиночных данных.

Гораздо более определенные суждения о горизонтальных движениях земной коры можно получить на основании изучения крупных региональных вертикальных разломов с существенно или преимущественно сдвиговой составляющей. Признаки молодых сдвиговых смещений известны на трех крупнейших разломах среднеазиатского орогена — Таласо-Ферганском [1, 10, 11], Джунгарском [2, 7] и Дарваз-Каракульском [8, 9]. Собранный названными авторами фактический материал дополнен возрастными оценками и определениями скорости сдвига в разные промежутки времени. Это позволило составить сводные графики горизонтальных движений по сдвигам (рис. 2, 3). Для сравнения на них представлены в аналогичном виде рассчитанные автором или приводимые в литературе величины и скорости смещения по другим крупнейшим сдвигам Земли.

Представленные материалы дают основание для следующих выводов:

1. Величина сдвига на всех разломах тем больше, чем больше рассматриваемый отрезок времени. Это свидетельствует об унаследованности и направленности сдвига в течение последних миллионов и тысяч лет. Никаких признаков возвратных движений (кроме возможной упругой отдачи при землетрясениях, которая здесь не рассматривается) по этим разломам не отмечается, что подтверждает известный тезис о необратимости горизонтальных движений по разломам.

2. Можно предположить относительное постоянство величин среднерасчетной скорости сдвига в течение последних сотен тысяч лет по каждому из рассмотренных разломов — несколько миллиметров в год по отдельному разрыву в пределах зоны и, возможно, около 10 мм/год по каждой зоне в целом. Такие же скорости можно ожидать по этим разломам и в настоящее время в среднем за столетия и тысячелетия.

3. Среднерасчетные скорости за поздний плейстоцен и голоцен на каждом разломе на порядок или более превышают среднерасчетные скорости не только за кайнозой, но и за новейшее время. Поэтому последние не могут использоваться непосредственно для оценки современных движений (и наоборот). Но и среднерасчетные скорости сдвига за поздний плейстоцен и голоцен не обязательно проявляются на каж-

дом участке зоны разлома в текущие десятилетия и столетия из-за неравномерности, импульсности сдвигания на ряде участков.

Вопрос о периодичности или импульсности движений приобретает теперь первостепенное значение не только при определении хода и механизма движений по разломам и деформаций в широких зонах вдоль разломов, но и в оценках сейсмической опасности на разных участках разломов. Однако мы можем привести лишь отрывочные сведения по данному вопросу применительно к рассматриваемым зонам разломов Средней Азии.

По геолого-геоморфологическим признакам (резкость сдвинутых форм, резкие перестройки речной сети, разорванность более ранних четвертичных отложений при ненарушенности более поздних) и по аналогии с известными сдвиговыми сейсмотектоническими смещениями во время землетрясений большинство авторов признает импульсность сдвиговых смещений [1, 7, 9—11]. Определить длительность геологических импульсов (возможно, состоящих из нескольких сейсмических) при современной степени изученности трудно. На Таласо-Ферганском разломе отмечается активизация сдвигания в позднем плейстоцене и раннем голоцене [11], на Дарваз-Каракульском — в позднем голоцене [8] длительность импульсов порядка нескольких тысяч лет.

Показателен участок Дарваз-Каракульского разлома северо-восточного простираения к юго-западу от Памирского тракта, где отчетливо видны следы позднеплейстоценового и голоценового левостороннего сдвигания. Исследования автора показали, что последнее смещение на 5—15 м произошло между 5000 и 2000—1000 лет назад в виде импульса (сейсмотектонической подвижки или серии подвижек), после которого сдвигание на этом участке отсутствует [8, 9]. Среднерасчетная скорость сдвигания на этом участке за поздний голоцен получается 5—10 мм/год, что аналогично скорости за последние сотни тысяч лет. Это позволяет допустить существование аналогичных импульсов и в более раннее время и в будущем.

К сожалению, в Средней Азии и на прилегающих территориях до сих пор не делаются инструментальные измерения современных движений в зонах сдвигов ни в связи с землетрясениями, ни в спокойные периоды.

Данные о горизонтальных движениях по разломам (см. рис. 1) согласно указывают на существование правостороннего сдвигания по разломам северо-западного простираения, левостороннего — по разломам северо-восточного простираения и субмеридионального сближения по разломам субширотного простираения. Аналогичная направленность современных смещений выводится и из сейсмологических данных путем определения подвижек в очагах сильных землетрясений [15]. Такое распределение смещений, по-видимому, отражает существование в позднем плейстоцене, голоцене и в настоящее время единой системы сжимающих усилий в земной коре региона с преобладанием субмеридионального регионального сжатия.

В центральной и западной частях Афгано-Таджикской депрессии известны субмеридиональные взбросы и надвиги, в том числе на средне- и позднечетвертичные отложения, свидетельствующие о субширотном сжатии в соответствии с разворотом простираения геологических структур от субширотного к субмеридиональному.

Картина преобладающего регионального субмеридионального сжатия в последние сотни и тысячи лет согласуется с представлениями ряда тектонистов о господстве субмеридионального сжатия в более ранние геологические эпохи.

Рассмотрение сейсмической опасности в зонах господства и существенного проявления горизонтальной составляющей движений осуществлено двумя способами. В основу каждого из них положен факт приуро-

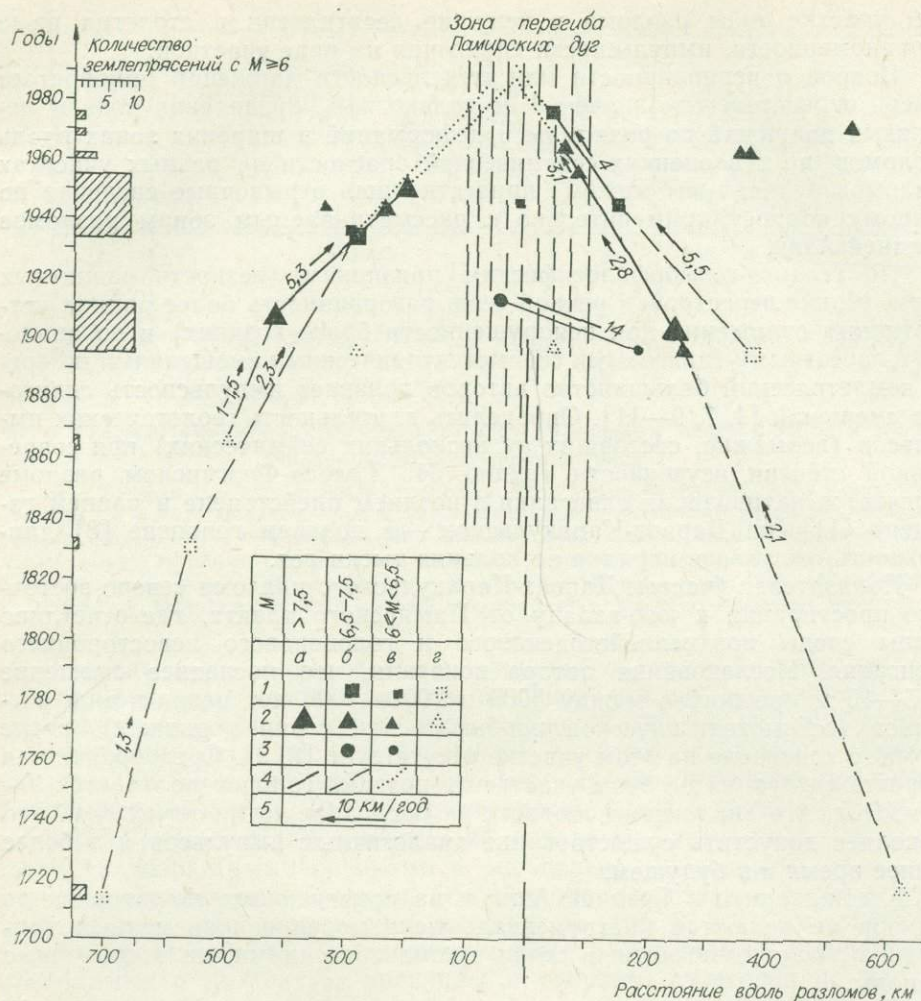


Рис. 4. График миграции сильных землетрясений с очагами в земной коре вдоль основных зон разломов юга Средней Азии.

Землетрясения в зонах разломов: 1 — Гиндукуш — Дарваз-Каракульской; 2 — Гиссаро-Кокшаальской; 3 — Рушано-Пшартской; а — землетрясения с $M=7,5$; б — землетрясения с $7,5 > M > 6,5$; в — землетрясения с $6,5 > M > 6$; г — разрушительные землетрясения по историческим и макросейсмическим данным; 4 — миграция землетрясений: а — надежная, б — менее уверенная, в — предполагаемая в будущем; 5 — направленность и скорость миграции.

ценности сильных ($M=6,5$) землетрясений в земной коре к зонам разломов, а также представление о возникновении сильных землетрясений при хрупком разрушении, в сопровождении смещений по разрывам после периода накопления упругих деформаций в широких зонах разломов. Кроме того, нам представляется очень важным использование таких закономерностей, как унаследованность направления движений по разломам, возможное сохранение среднерасчетных величин скорости за периоды в десятки и сотни тысяч лет, чередование (во всяком случае, на отдельных участках) сейсмотектонических подвижек при сильных землетрясениях и периодов покоя продолжительностью в десятки, сотни или даже первые тысячи лет. Эти закономерности применительно к разломам Средней Азии были рассмотрены ранее.

Первый способ разработан применительно к Калифорнии. Он предусматривает знание долговременной геологической скорости сдвигания по разлому, скорости современного сдвигания (в том числе нулевой) и

величины единовременной подвижки при сильных землетрясениях в зоне. Предполагается, что скорость накопления упругой деформации в широкой зоне вдоль разлома в промежутках между сильными землетрясениями сохраняется той же, что и долговременная скорость смещения по разлому, во всяком случае при отсутствии медленных смещений между сильными землетрясениями.

Мы можем ориентировочно оценить повторяемость землетрясений на отдельных участках сдвигов Средней Азии. Для Таласо-Ферганского разлома долговременная скорость правостороннего сдвигания, по нашим определениям, составляет 4 мм/год (см. рис. 2, 3). Для накопления деформаций, обеспечивающих смещение на 1—1,5 м, как при 9-балльном Чаткальском землетрясении 1946 г. [13], потребуется 250—375 лет.

Для Сагирдаштского участка Дарваз-Каракульской зоны разломов долговременная скорость была определена примерно в 7 мм/год (см. рис. 2, 3), а смещение при сильном позднеголоценовом землетрясении, судя по сейсмодислокации, 5—10 м. Для накопления деформаций, обеспечивающих такое смещение, потребуется 700—1400 лет при условии, что медленные смещения по разлому отсутствуют, как это установлено для последних 1—2 тыс. лет на данном участке [9]. При нынешнем уровне знаний приведенные величины могут считаться периодами повторяемости сильных землетрясений на рассмотренных участках.

Ясно, что для использования и усовершенствования данного способа в Средней Азии необходимы целенаправленные геолого-геоморфологические работы для определения долговременной скорости горизонтальных движений по разломам и определения возраста сеймотектонических подвижек, с одной стороны, инструментальные измерения современных медленных горизонтальных смещений и величины единовременных подвижек по разломам при землетрясениях — с другой.

Второй способ оценки сейсмической опасности исходит из обнаруженной автором линейной миграции сильных землетрясений вдоль крупнейших зон разломов Средней Азии. Наиболее отчетливо миграция проявляется вдоль Дарваз-Каракульской и Гиссаро-Кокшаальской зон разломов (рис. 4). Миграция происходит от флангов к вершине Памирских дуг со скоростью в несколько километров в год и может быть связана с господством субмеридионального сжатия. Во всяком случае, миграция свидетельствует о современной подвижности крупных зон разломов практически на всем их протяжении, что явствует и из приведенных данных о молодых движениях по ним. По данным о некоторых исторически сильных землетрясениях и определениям скорости миграции землетрясений, период повторяемости сильных землетрясений на каждом данном участке названных разломов можно оценивать свыше 100 лет, вероятно 250—300 лет.

Выявленные направленность и скорость миграции сильных землетрясений, если их экстраполировать в будущее, можно использовать для попытки выделения участков возможных в недалеком будущем сильных землетрясений в пределах изученных зон. К таким участкам в пределах СССР мы относим северный склон Заалайского хребта и Алайскую долину, западную часть северных предгорий Киргизского хребта, возможно юго-западную часть Гиссарского хребта, хр. Каратау и северо-восточную оконечность хр. Кунгей Ала-Тау. Эти места, особенно центральная часть Алайской долины, рекомендуются для целенаправленных геолого-геоморфологических геофизических исследований и повторных геодезических измерений с целью наблюдения за динамикой молодых и современных процессов и обнаружения возможных предвестников сильных землетрясений. Геодезические измерения горизонтальных движений по основным сдвигам Средней Азии необходимы для научных исследований с более дальней перспективой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буртман В. С. Современные горизонтальные смещения по Таласо-Ферганскому разлому в Тянь-Шане.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 2. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1965.
2. Войтович В. С. Природа Джунгарского глубинного разлома. Вып. 183. М., «Наука», 1969.
3. Губин И. Е. Закономерности сейсмических проявлений на территории Таджикистана. М., Изд-во АН СССР, 1960.
4. Гуценко О. И., Степанов В. В. Механизм формирования структур, поле напряжения и современные движения западной части хребта Петра I.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
5. Конопальцев И. М. Движение земной коры на Гармском полигоне по измерениям 1948—1970 гг.— «Геотектоника», 1971, № 5.
6. Конопальцев И. М., Медведев В. Г., Давлатов Н. Д. Горизонтальные движения земной коры на Гармском геодинамическом полигоне по измерениям 1968—1971 гг.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
7. Курдюков К. В. Современные разломы вдоль подножий Джунгарского Алатау.— «Природа», 1953, № 12.
8. Никонов А. А. Анализ тектонических движений по Гиндукуш-Дарваз-Каракульской зоне разломов в позднем плиоцене и в четвертичное время.— «Бюлл. МОИП. Отд. геол.», 1975, № 2.
9. Никонов А. А. Сейсмотектонические дислокации Южного Таджикистана и их значение для сейсмического районирования.— В кн.: Современные сейсмодислокации и их значение для сейсмического микрорайонирования. Изд-во МГУ, 1976.
10. Раницман Е. Я., Пшенин Г. Н. Первые результаты геоморфологических исследований новейших горизонтальных смещений земной коры по Таласо-Ферганскому разлому в Средней Азии.— «Изв. АН СССР. Сер. геогр.», 1963, № 5.
11. Раницман Е. Я., Пшенин Г. Н. Новейшие горизонтальные движения земной коры в зоне Таласо-Ферганского разлома по данным геоморфологического анализа.— В кн.: Тектонические движения и новейшие структуры земной коры. М., «Недра», 1967.
12. Скобелев С. В., Флоренский П. В. Голоценовые тектонические деформации и оползни в Вахшской надвиговой зоне.— «Геотектоника», 1974, № 5.
13. Федоренко В. С. Тектонические и сейсмические явления и их значение в формировании катастрофических обвалов и оползней (в районах Чаткальского и Алайского горно-складчатых сооружений).— В кн.: Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 2. Изд-во МГУ, 1968.
14. Финько Е. А., Эрман В. Б. Современные движения земной поверхности в зоне Сурхобского разлома.— «Геотектоника», 1971, № 5.
15. Широкова Е. И. Детальное изучение напряжений и разрывов в очагах землетрясений Средней Азии.— «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1974, № 11.

ЕВРОПЕЙСКАЯ ЧАСТЬ СССР

В. С. Вереда, Ф. М. Урманцев, Б. К. Юрченко,
В. Г. Суровцев, В. Г. Саенко, Ф. И. Динье

ДЕВЯТЬ ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ДОНЕЦКОМ БАССЕЙНЕ

Девять лет назад был создан Донбасский геодинамический полигон для выявления особенностей современных движений земной коры и их связи с газодинамическими явлениями в угольных шахтах. На полигоне проводится следующий комплекс исследований.

1. *Вертикальные движения* изучаются по двум нивелирным линиям на Енакиевском и Харцызском участках, где заложено 244 фундаментальных и грунтовых репера. Работы осуществляются одними и теми же инструментами *Ni-004* и *Koni-007*, инварными рейками, ежегодно проверяемыми на компараторе МИИГАиК по специальной программе, дающей наибольшую точность измерений [1]. Нивелирования в течение трех лет проводились ежемесячно. Ежегодно в одно и то же время проводится нивелирование всех реперов полигона. В результате 9-летних наблюдений установлено, что современные вертикальные движения со средними скоростями от 0 до 3—4 мм/год приурочены к определенным блокам, в пределах которых отмечается пульсационно-колебательный характер движения с периодом активизации около 5 лет [2]. За истекшее время на Донбасском полигоне накоплены данные для решения следующих вопросов:

а) сезонность движения отдельных реперов, приуроченных к определенной зоне [1]; б) период, величина и время активной части движений в результате подработки реперов горными работами; в) влияние интервала времени между повторными нивелированиями на величину скорости современных вертикальных движений; г) влияние условий закладки различных типов реперов на величину их движений; д) приуроченность выявленных региональных газодинамических зон [3] к участкам с наибольшими градиентами скоростей современных вертикальных движений.

2. *Горизонтальные движения* изучаются с помощью точной триангуляции и линейных измерений. Сеть триангуляции в районе полигона окончательно создана в 1938—1939 гг. Наружные металлические знаки построены в виде простых и сложных сигналов. Центры заложены стандартные. Угловые измерения характеризуются средней квадратической ошибкой 2", а средние невязки треугольников составляют 2",8 по сети 2-го класса. После войны, в 1947—1949 гг., триангуляционные работы были повторены. Средняя квадратическая ошибка измерения угла в сети 2-го класса равна 1",2.

В 1973 г. проведены повторные угловые измерения на 16 пунктах 2-го класса постройки 1947—1949 гг. Углы измерялись теодолитом ОТ-02 по программе наблюдений на пунктах государственной триангуляции 2-го класса. Средняя квадратическая ошибка измерения угла равна 1".

Таким образом, в настоящее время имеются материалы наблюдений трех эпох для выявления горизонтальных движений в пределах полигона. Уравнивание и вычисление координат пунктов выполнено на

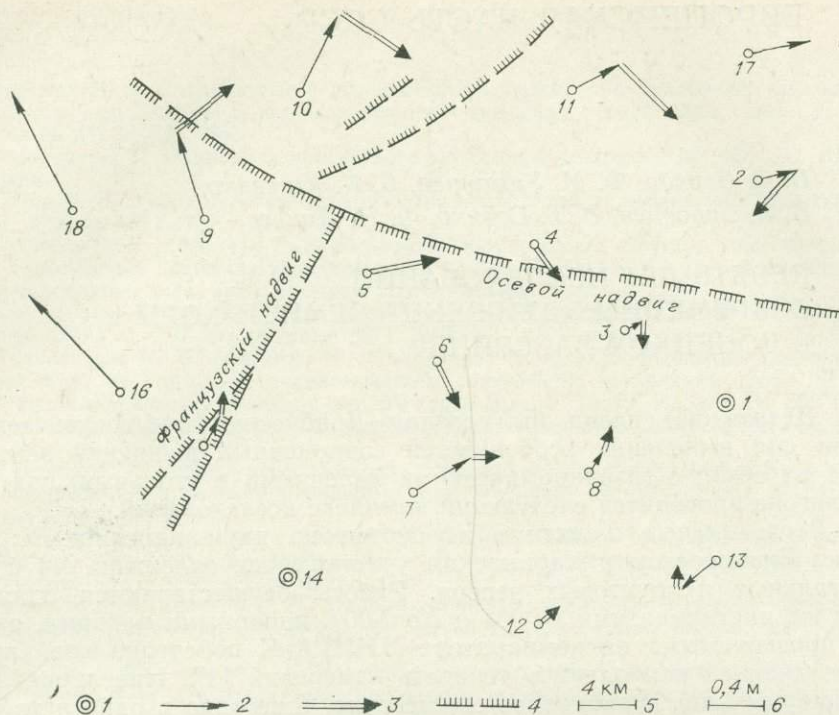


Рис. 1. Современные горизонтальные движения земной коры на Донбасском геодинамическом полигоне по повторным измерениям углов.

1 — твердые пункты; 2 — векторы смещений по данным 1949—1938 гг. и 3 — 1973—1949 гг.; 4 — разрывы; 5 — горизонтальный и 6 — вертикальный масштабы векторов.

ЭВМ «Наири-2» по программе, составленной Н. С. Зайцевой [4]. По разностям координат вычислены векторы предполагаемых движений. Сначала сети уравнивались как свободные относительно пунктов 1 и 2. Анализ векторов движений и разностей измеренных углов в 1973 и 1949 г. позволяет указать дополнительные жесткие пункты — 12, 14, 15 и др. (рис. 1). Для нашей сети были выбраны пункты 1 и 14, разнесенные друг от друга на три стороны и находящиеся в одинаковых геологических условиях. Это обеспечивает наименьшие угловые и линейные деформации векторов при возможных неучтенных подвижках пунктов 1 и 14. Координаты пунктов полигона для всех трех эпох получены относительно этих твердых пунктов. По ним вычислены векторы движений (см. рис. 1). Одновременно в уравнение включены функции для определения точности координат. Для эпохи 1938 г. средняя квадратическая ошибка положения пункта 10 относительно исходных составляет 0,6 м,

для 1949 и 1973 гг. — 0,4 м.

Таким образом, средняя квадратическая ошибка вычисления векторов в наиболее слабом месте рав-

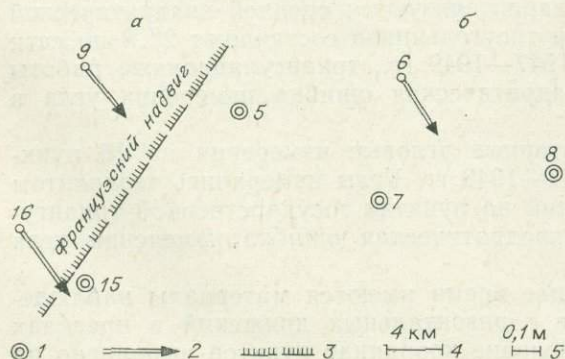


Рис. 2. Сжатие вдоль Французского надвига (а) и сдвиг пункта 6 (б) по повторным измерениям углов.

1 — твердые пункты, 2 — векторы смещений по данным 1973—1949 гг., 3 — разрывы; 4 — горизонтальный масштаб; 5 — масштаб векторов.

на 0,7 м. Средняя квадратическая ошибка векторов, расположенных по соседству с твердыми пунктами, не превышает 0,2 м. Далее был выполнен анализ по отдельным участкам [5]. Сопоставление векторов и углов, измеренных в разные эпохи, позволяет выделить район пункта 6 и участок вдоль Французского надвига. Движения пунктов 6, 9 и 16 вычислены вновь относительно соседних пунктов по измерениям 1949 и 1973 гг. (рис. 2). По результатам вычислений с вероятностью 70% можно утверждать, что вдоль Французского надвига наблюдается сжатие со скоростью порядка 1—2 см/год. Сдвиг пункта 6 по направлению к пунктам 7, 8 равен 0,3 м, однако на движение пункта 6, возможно, оказывают влияние горные работы в шахте «Тернопольская-Комсомольская».

На активных участках Французского и Осевого надвигов в 1974 и 1975 гг. проведены угловые и линейные измерения по программе 1-го класса повышенной точности. На 1976—1980 гг. намечено ежегодное проведение аналогичных работ на этих участках.

3. *Наклономерные наблюдения* проводятся для подтверждения выявленных движений другим методом, а также для выявления возможных предвестников внезапных выбросов угля и газа в шахтах. Для этих целей построены две наклономерные станции в горных выработках шахт: «Коммунист» — на глубине 350 м и «Юнком» — на глубине 700 м. На станции Харцызск-I (шахта «Коммунист») наблюдения проводятся в течение трех лет, на станции «Юнком» наблюдения начаты в 1975 г. На шахте «Коммунист» от наклономерной станции проложен подземный нивелирный профиль, закрепленный 19 фундаментальными реперами в горной выработке, пройденной 20 лет тому назад. Реперы нивелируются раз в месяц. Подземный профиль расположен параллельно реперам на поверхности. Предполагается, что эти исследования помогут осветить вопрос о природе сезонных движений поверхностных реперов, а также о связи поверхностных движений с глубинными.

4. *Геофизические исследования.* На полигоне параллельно Енакиевскому геодезическому профилю трестом Днепрогеофизика выполнены работы по ГСЗ на линии Артемовск — Свердловск. Полученные данные позволили выявить строение земной коры вдоль линий полигона и увязать результаты исследований современных движений с геоструктурными элементами. На полигоне заложено 18 гравиметрических пунктов, где измеряется Δg с интервалом в 2—3 года в один и тот же сезон с точностью $\pm 0,1$ мгал.

На ряде пунктов зафиксировано изменение Δg , превышающее тройную среднюю квадратическую ошибку измерений. Над Волновахско-Чернухинской зоной разломов, выявленных по ГСЗ и по данным повторного нивелирования (как участков повышенных градиентов движений), а также на Харцызском участке с помощью специальной гелиевой съемки обнаружена интенсивная галиевая аномалия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вереда В. С., Урманцев Ф. М., Юрченко Б. К., Филькин В. А.* Некоторые результаты изучения современных тектонических движений в Донецком бассейне. — В кн.: Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. Ташкент, «Фан», 1972.
2. *Вереда В. С.* О характере современных вертикальных тектонических движений земной коры в Донецком бассейне. — «Докл. АН СССР», 1974, т. 218, № 3.
3. *Вереда В. С., Юрченко Б. К., Губин В. Н., Суворцев В. Г.* О региональном прогнозе выбросоопасности угольных пластов в Донецком бассейне. — В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Вып. 36. Киев, «Техника», 1974.
4. *Зайцева Н. С.* Программа уравнивания комбинированных геодезических сетей на ЭВМ «Наири-2». М., 1973.
5. *Наумов Я. В.* Вопросы изучения горизонтальных движений земной коры геодезическими методами. — В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СКОРОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В КАРПАТАХ

Данные о направленности и интенсивности деформаций земной коры, количественно характеризующие процессы, которые протекают в нижних частях земной коры и верхней мантии, стали крайне необходимыми при комплексной интерпретации геофизического материала. А установление активных в настоящее время глубинных разломов тесно связано с выяснением перспектив нефтегазоносности, разведкой месторождений других полезных ископаемых [2] и с поиском возможных предвестников землетрясений [3]. Однако имеющихся данных о современных вертикальных и горизонтальных движениях земной коры на территории СССР, в частности Карпат, для решения перечисленных задач недостаточно.

Для отдельных частей республики уже накоплен и продолжает накапливаться материал по современным движениям земной коры как в виде кривых скорости вдоль профилей, так и в виде сводных карт. Но для их эффективного использования в различных аспектах важно выяснить закономерности в пространственно-временном распределении современных деформаций земной коры. Среди этих закономерностей ведущее место занимает вопрос об изменениях знака и интенсивности перемещений земной коры во времени, а также о возможной природе изменений. Их изучение позволит разработать надежные методы прогнозирования современной тектонической активности. Важный момент этого прогноза — широкое использование совокупности геолого-геофизических признаков в комплексе с аппаратом математической статистики. Тогда, с одной стороны, будут установлены стохастические многомерные зависимости между искомыми параметрами, с другой — эти статистические закономерности дадут возможность подойти к объяснению ряда причинно-следственных связей при условии, что под корреляционный анализ заложены определенные геолого-геофизические предпосылки. А имеющиеся в настоящее время программы распознавания образов позволят прогнозировать труднодоступные для измерения параметры по совокупности известных геолого-геофизических величин.

Так, если иметь для сравнительно большой территории совокупность геолого-геофизических параметров, таких как амплитуда неоген-четвертичных движений земной поверхности, вулканизм, продольные и поперечные разломы, узлы их пересечения, градиенты изостатических аномалий, тепловой поток, мощности отдельных слоев и всей коры в целом, то можно прогнозировать современную тектоническую активность. А так как землетрясения — это разрядка тех же тектонических напряжений, то, следовательно, можно прогнозировать и максимальную магнитуду землетрясений.

Использование только парных корреляционных зависимостей, например между мощностью и скоростью современных вертикальных движений земной коры или между последней и осредненным гравитационным полем, не отображает всей совокупности факторов, влияющих на интенсивность современных тектонических движений земной коры. Она более сложна и многогранна. К тому же данными ГСЗ обнаружена целая зона перехода от земной коры к верхней мантии. Поэтому, с какой именно границей Мохо следует коррелировать скорость современных движений земной коры, неясно. Например, исполь-

зуя методику выделения системы разломов [8] и характеризуя полученные таким образом блоки земной коры совокупностью геолого-геофизических параметров и известными величинами скорости современных движений, можно получить регрессионные многомерные соотношения между ними, используя которые по комплексу геолого-геофизических параметров, можно находить неизвестные в этих местах значения скорости современных движений земной коры.

Что касается изучения природы переходного слоя от земной коры к верхней мантии и идентификации выделяемых в ней реликтовых поверхностей Мохо с определенными стратиграфическими горизонтами осадочного чехла, то у авторов есть разработанная методика для Днепровско-Донецкой впадины [4], которая может быть использована и для Карпатского региона.

Далее будут освещены первые результаты изучения геодезическим методом пространственно-временных закономерностей современных вертикальных движений земной коры на территории советской части Карпатского региона, к которому относятся Складчатые Карпаты, Закарпатский внутренний прогиб, Предкарпатский передовой прогиб и юго-западная полоса Восточно-Европейской платформы.

Первое точное нивелирование здесь было выполнено в 1882—1891 гг. Венским военно-географическим институтом [9], второе точное измерение — в 1924—1937 гг. Пражским военно-географическим институтом, Министерством общественных работ Чехословакии в Закарпатье и Министерством путей сообщения Польши в Предкарпатье [11].

Детальное изучение методов трех последних нивелирований и технических данных применявшихся приборов, вычисление случайных и систематических ошибок были выполнены нами ранее [5]. В 1972 г. закончен анализ нивелирования, проложенного в 1961—1972 гг. Вычисление возможных ошибок определений относительных значений скорости при последовательном сопоставлении измерений позволило принять окончательное решение о возможности использования перечисленных выше нивелирований для получения количественных характеристик вертикальных деформаций земной коры. Отсутствие влияния инженерно-геологического фактора на устойчивость большинства нивелирных знаков, используемых для определения интенсивности движений, показали результаты геолого-геоморфологических обследований, проведенных в 1968 г. сотрудниками Института географии АН СССР Д. А. Лиленбергом и Н. С. Благоволитным. В качестве исходных данных для вычисления абсолютных значений скорости современных вертикальных движений земной коры использованы ее значения в пунктах Тернополь — Золочев: $+2,8 \text{ мм/год} \pm 1,1 \text{ мм/год}$ [10].

На рис. 1 представлены карты современных вертикальных движений земной коры, построенные для разных временных интервалов.

Карта на рис. 1, а составлена на основе данных нивелирований 1882—1891 и 1924—1937 гг. по полигонам Тернополь — Коломыя — Дулибы — Рава-Русская — Золочев — Тернополь (870,2 км) и Коломыя — Деловое — Дулибы — Коломыя (623,1 км). Невязка скорости в первом полигоне составляет $-0,3 \text{ мм/год}$, во втором — $+2,5 \text{ мм/год}$. Разрывы в кривой скорости имеют место только во втором полигоне в горной части Карпат на участках Бескид — Воловец (9,0 км) и Деловое — Коломыя (139,8 км). Подсчет ошибок относительно скорости в пунктах Дулибы (узловой пункт в Предкарпатье) и Деловое (в Закарпатье) производился по формуле

$$m_v = \frac{\sqrt{(\eta_1^2 + \eta_2^2)}}{\Delta t},$$

где

$$\eta = \frac{[\eta_i p_i]}{[p_i]},$$

η_1 и η_2 — средние квадратические случайные ошибки первого и второго нивелирований на 1 км хода, L — длина линий, Δt — промежуток времени между измерениями, p_i — вес длины отдельного участка.

Для первого пункта изменение интенсивности движений относительно начального пункта составляет — 2,0 мм/год с ошибкой его определения $\pm 0,4$ мм/год, для второго достигает — $1,3 \pm 0,7$ мм/год.

На всем периметре полигона Золочев — Батево — Деловое — Коломыя — Тернополь — Золочев (рис. 1, б) в качестве исходных данных использованы материалы прецизионных чехословацких (1924—1928 гг.) и польских (1931—1937 гг.) нивелирований. Повторным являлось высокоточное нивелирование, выполненное советскими геодезическими организациями.

Кривая скорости в этом варианте имеет два разрыва в горной части Карпат на участках Бескид — Свалява (в 44,5 км) и Вороненка — Ясиня (65,2 км). При определении невязки скорости полигона предполагается постоянство интенсивности смещений в пунктах, ограничивающих эти участки. Величина невязки достигает — 0,6 мм/год. Она равномерно разбросана по всему периметру полигона (914,9 км). Полигон дополнен двумя висячими ходами: Батево — Ужгород — Мал. Березный и Львов — Рава-Русская.

Вычисление средних квадратических ошибок относительной скорости в трех пунктах показало, что выявляемые изменения интенсивности движений значительно превышают m_v :

Пункт	Δv , мм/год	m_v мм/год
Стрый	—0,6	$\pm 0,3$
Батево	—2,2	$\pm 0,4$
Деловое	—0,6	$\pm 0,4$

Карта на рис. 1, в составлена на основе данных первого и третьего нивелирований по полигону Яблонь — Тернополь — Красне — Львов — Батево — Рахов — Коломыя — Яблонь (1126,7 км). С целью устранения невязки скорости полигона, равной +1,3 мм/год, в определяемые значения скорости современных движений реперов введены поправки пропорционально их удаленности от исходного пункта. Значения относительных изменений скорости в пунктах (мм/год): Коломыя 1,1, Рахов — 1,7, Батево — 3,1 и Деловое — 1,0 определены с ошибкой $\pm (0,4—0,6)$.

Преимуществом представленных выше карт, в отличие от ранее предлагавшихся вариантов [1], является то, что количественные характеристики современных деформаций земной коры для всей изучаемой территории получены из нивелирований, исполненных в каждую отдельную эпоху. Ранее для вычислений скорости современных движений земной коры в разных частях региона привлекались материалы нивелирований, проложенных в различное время.

Построенные карты отличаются также абсолютным значением современных движений земной коры. Это обусловлено тем, что в качестве исходных данных при их составлении использованы абсолютные значения скорости, приведенные на карте современных вертикальных движений земной коры на территории Восточной Европы (масштаб 1 : 2500 000), которая демонстрировалась на XV Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического Союза в 1971 г.

Сравнение карт позволяет заключить, что за 80-летний период (см. рис. 1, в) и за первую его половину (см. рис. 1, а) Карпаты испытывали поднятие по отношению к предгорьям с максимумом скорости в наиболее высокогорной части. На карте, соответствующей 44-летнему периоду (см. рис. 1, а), возрастание скорости к срединной части

Карпат на обоих склонах разное: большее на северо-восточном и незначительное на юго-западном.

Во второй половине периода (см. рис. 1, б) наблюдается уменьшение скорости воздымания Карпат по отношению к северо-восточным предгорьям с минимумом в высокогорной части. На юго-западном склоне отмечается поперечная к простиранию горной системы зональность в распределении интенсивности современных движений с возрастанием темпа поднятий к Раховскому кристаллическому массиву. В этот период поднятие захватывает весь Закарпатский внутренний прогиб.

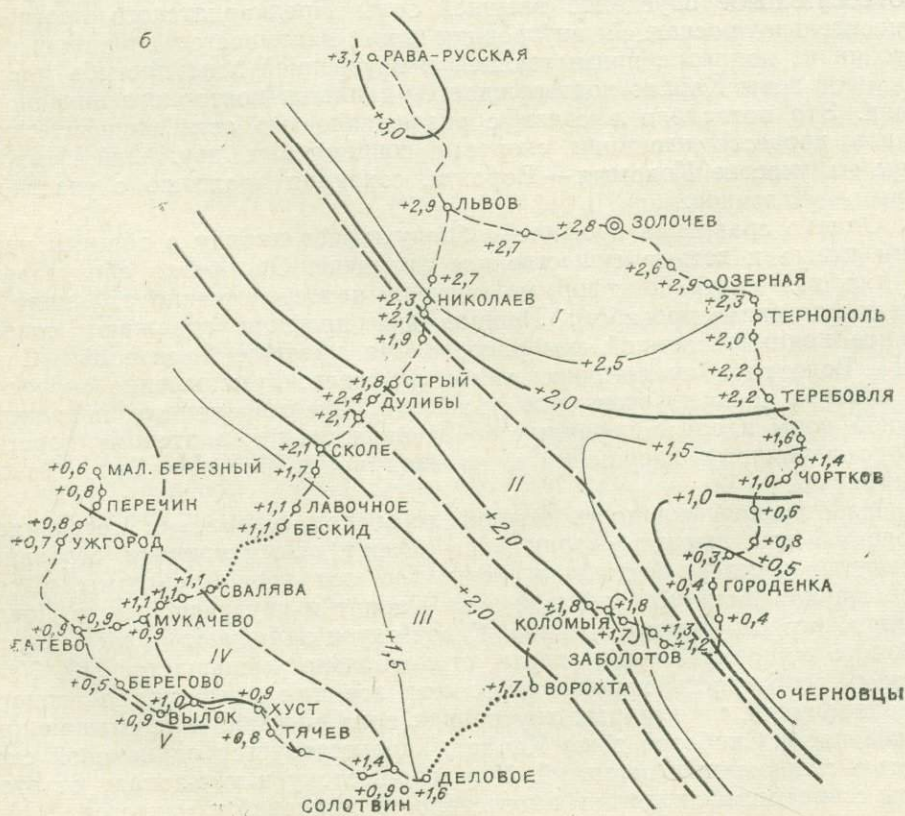
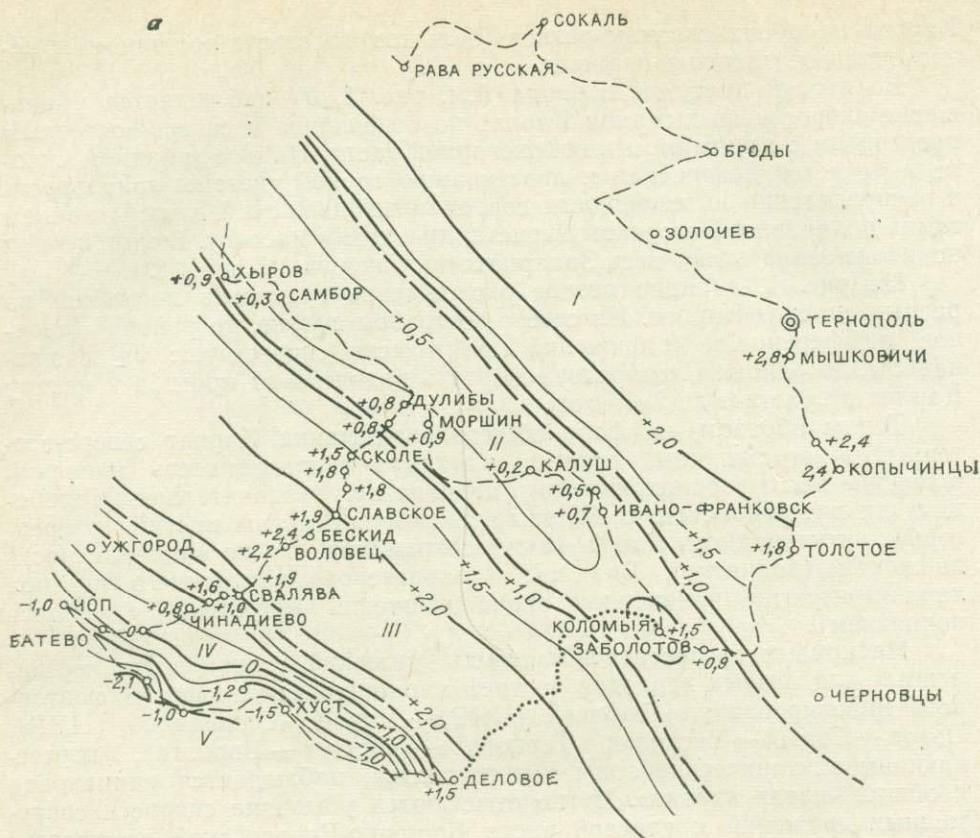
На рис. 1, в видно резкое расхождение градиента движений на разных склонах Карпат. На северо-восточном склоне, до района Лавочное, дифференциация движений практически отсутствует: на юго-западном, до района Скотарское, скорость поднятий от прогиба к центру Карпат возрастает до 2 мм/год.

Таким образом, на фоне общего воздымания Карпат северо-восточный и юго-западный склоны сохранили направленность движений в течение всего рассматриваемого периода при незначительных колебаниях их интенсивности. В Предкарпатском передовом прогибе и предгорьях юго-западного склона также сохранялась та же направленность движений (поднятие). Впадины Закарпатского внутреннего прогиба характеризуются изменением знака движений (опускание сменялось поднятием).

На кривых скорости современных движений земной коры, составленных для разных периодов по трем параллельным профилям повторного нивелирования (Любачев (ПНР) — Хыров — Ольшаница (ПНР), Львов — Стрый — Бескид и Тернополь — Снятин — Ворохта), пересекающим тектонические зоны Предкарпатья, наблюдается одинаковая в общих чертах картина. Четко отмечаются убывание скорости современных движений к краевой части Восточно-Европейской платформы и относительное опускание внешней зоны Предкарпатского прогиба. Относительно последней внутренняя зона оказывается приподнятой. Устойчивое поднятие примыкающей к внутренней зоне прогиба части Скибовой зоны Карпат подтверждается данными повторного нивелирования. Это позволило в связи с разреженностью сети геодезических знаков провести изолинии скорости современных движений земной коры на участке Коломыя — Ворохта, сохраняя аналогию с участком Стрый — Лавочное.

Однако сравнение профилей обнаруживает наряду с общими чертами также и весьма существенное различие. Оно резко обозначается для той части платформы, которая непосредственно граничит с Предкарпатским прогибом. Первые два профиля отражают современное поднятие земной поверхности. На профиле Тернополь — Снятин — Ворохта в аналогичном месте отмечается уменьшение скорости от прогиба к платформе, что указывает на современные подвижки земной коры вдоль поперечных по отношению к карпатскому простиранию глубинных нарушений к краевой части Восточно-Европейской платформы.

Наибольшая мощность земной коры под Карпатами составляет около 65 км, причем «корни гор» имеют асимметричное строение, сдвинуты к северо-востоку относительно оси горной системы и соответствуют частично Скибовой зоне Карпат и внутренней зоне Предкарпатского передового прогиба. К востоку и западу от области «корней гор» мощность земной коры уступообразно уменьшается [6]. Указанную особенность хорошо отражают все три профиля повторного нивелирования, на которых внутренняя зона прогиба и примыкающая к ним часть Скибовой зоны Карпат, характеризуется одинаковой скоростью современных поднятий. К северо-востоку и юго-западу от этой зоны современных поднятий интенсивность движений изменяется.



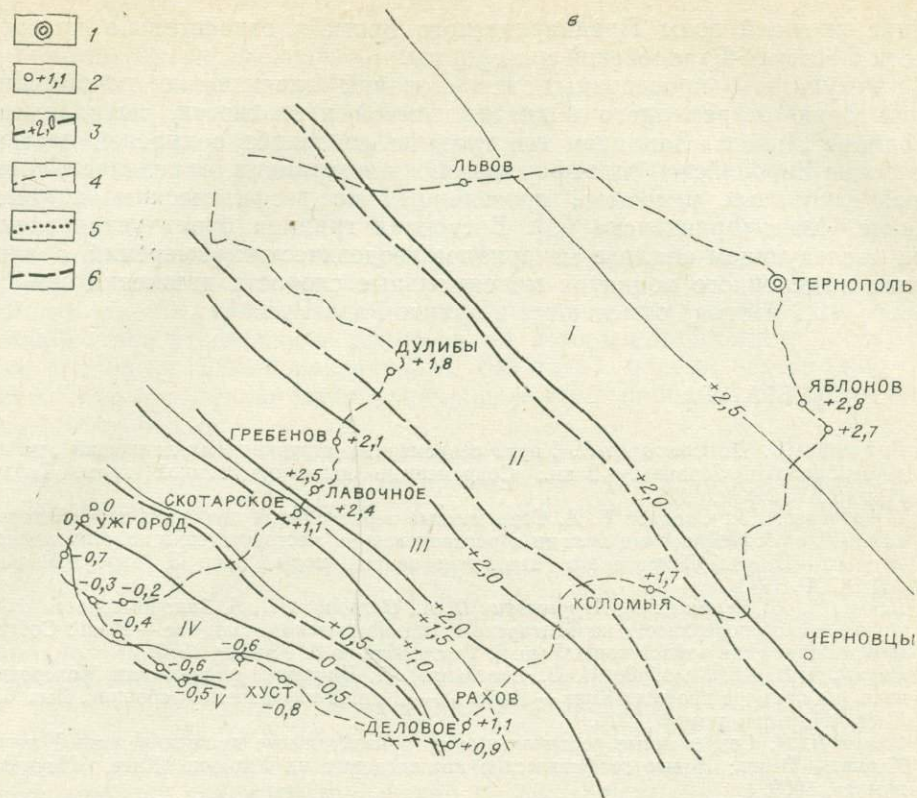


Рис. 1. Карты современных вертикальных движений земной коры западной части УССР. а — 1882—1891 и 1924—1937 гг.; б — 1924—1937 и 1949—1961—1972 гг.; в — 1882—1891 и 1949—1961—1972 гг.

1 — исходные пункты вычисления абсолютной скорости [1]; 2 — значения скорости в отдельных пунктах; 3 — изолинии скорости, мм/год; 4 — полигон повторного нивелирования; 5 — разрывы в полигоне; 6 — геологические границы крупных структурных единиц Карпатского региона (I — краевая часть Восточно-Европейской платформы, II — Предкарпатский передовой прогиб, III — Карпаты, IV — Закарпатский внутренний прогиб, V — Паннонская впадина); 7 — граница СССР.

Сделанные выводы подтверждаются изучением современных вертикальных движений земной коры вдоль профиля Заболотов — Стрый — Хыров, целиком расположенном в Предкарпатском передовом прогибе (рис. 2). Для периода с 1886—1891 по 1931—1934 гг. здесь отчетливо фиксируются приподнятый Коломыйский блок и увеличение скорости современных движений при переходе от внешней к внутренней зоне Предкарпатского передового прогиба. Данные по этому профилю указывают на то, что до Ивано-Франковска сохраняется опус-

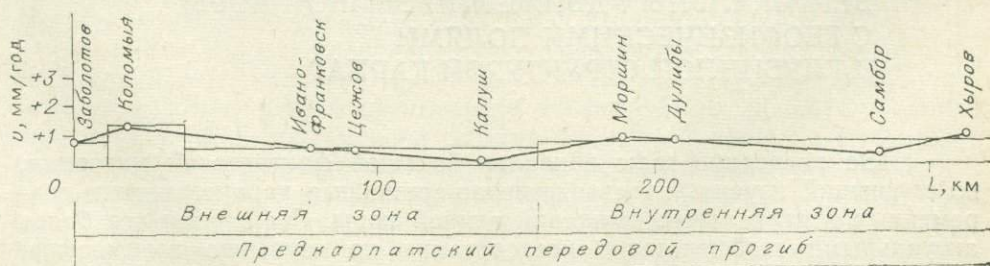


Рис. 2. График скорости современных вертикальных движений земной коры по профилю Заболотов — Стрый — Хыров.

вание внешней зоны Предкарпатского прогиба относительно краевой части Восточно-Европейской платформы.

Результаты проведенных исследований значительно расширили территорию современного поднятия земной поверхности, выявляемого в районе Львова. Западная его граница совпадает с краевой частью Восточно-Европейской платформы. Южная граница определяется серией глубинных разломов, проведенных по геофизическим данным южнее Ивано-Франковска [8]. Восточная граница будет установлена при последующем анализе материалов геодезических измерений. В пределах выделенного поднятия максимальные скорости движений земной коры ($+3,1$ мм/год) отмечаются в пункте Рава-Русская.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гофштейн И. Д., Сомов В. И. Карта современных вертикальных движений земной коры Западной Украины.— В кн.: Современные движения земной коры. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
2. Донабедов А. Т., Сидоров В. А. Современные вертикальные движения земной коры, их связь с геофизическими полями и распределением месторождений полезных ископаемых.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
3. Певнев А. К., Энман С. В., Атрушкевич П. А., Остропило П. А. Закономерности смещения земной поверхности на Талгарском геодинамическом полигоне.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
4. Рахимова И. Ш., Галабудя М. И., Альтман А. Д. Динамика поверхности Мохоровичича (на примере профиля Киев — Гомель).— В кн.: Геофизический сборник. Вып. 63. Киев, «Наукова думка», 1975.
5. Сомов В. И. Современные вертикальные и горизонтальные движения земной коры Карпат.— В кн.: Новые геофизические исследования на Украине. Киев, «Наукова думка», 1969.
6. Соллогуб В. Б., Чикунев А. В., Иванова А. П., Чирвинская М. В., Турчаненко Н. Т. Глубинное строение земной коры Восточных Карпат и прилегающих районов Украины по данным ГСЗ.— В кн.: Геофизические исследования строения земной коры юго-восточной Европы.— «Верхняя мантия», 1967, № 5.
7. Субботин С. И. Глубинное строение советских Карпат. Киев, «Наукова думка», 1955.
8. Изучение тектоники докембрия геолого-геофизическими методами. М., «Недра», 1972.
9. *Astronomisch — geodätischen Arbeiten des K. Militar-geographischen Instituts in Wien*, X. Wien, 1899.
10. Boulanger Yu. and others. Summary map of the recent vertical crustal movements for Eastern Europe. XV Assembly of the IUGG. Moscow, 1971.
11. *Katalog wysokości reperów polskiej podstawowej sieci niwelacyjnej*. Warszawa, 1939.

В. Г. Кузнецова

СВЯЗЬ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ С ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ И ГЛУБИННОЙ СТРУКТУРОЙ КАРПАТ

За последние годы накоплен большой фактический материал, позволяющий изучить пространственно-временные характеристики современных вертикальных движений земной коры. Становятся все более актуальными геофизические исследования по изучению взаимосвязи современных деформаций с геофизическими полями и глубинной структурой отдельных регионов для установления закономерности проявления современных движений в различных геотектонических зонах.

Комплексные исследования современных деформаций земной коры в Карпатах уже позволили получить первые результаты и установить ряд закономерностей проявления современных вертикальных движений в регионе. Этому способствовало наличие по территории Карпат обширного геолого-геофизического материала (данные площадных гравиметровых магнитных съемок и сети сейсмических и геомагнитных станций, профили ГСЗ и КМПВ, глубинные магнитотеллурические зондирования, результаты изучения физических свойств пород и т. д.), детальная увязка и совместная интерпретация которого позволяют составить модель глубинного строения региона, выделить основные блоки земной коры и глубинные разломы, по которым происходят современные подвижки земной поверхности. Без такой модели невозможно подойти к установлению связи современных движений земной коры с глубинным строением.

Помимо этого, совместный анализ гравитационного, магнитного, теплового полей, сейсмичности с данными ГСЗ и результатами изучения новейших и современных движений показывает, что на территории советских Карпат имеется область современной тектонической активизации, которая может служить природной лабораторией для постановки многолетних исследований по изучению вековых вариаций физических полей Земли. Таким интересным районом является юго-западная часть советских Карпат, охватывающая зону сочленения Складчатых Карпат с Закарпатским внутренним прогибом и собственно территорию прогиба. Этот район пересекается с северо-запада на юго-восток глубинным Закарпатским (Пиенинским) разломом, который отделяет разные по мощности и составу блоки земной коры и является важнейшей сеймотектонической зоной Карпат. К нему также приурочиваются вулканогенные образования Выгорлат-Гутинской гряды, а многофазность излияний вдоль разлома свидетельствует о неоднократном возобновлении тектонической активности этой области. Территория Закарпатского прогиба — это район наибольшей контрастности и дифференцированности новейших движений. Современная тектоническая активность территории подтверждается повышенным тепловым потоком, среднее значение которого составляет $2,15 \pm 0,1$ кал/см²·с.

На этой территории Львовским филиалом Института геофизики АН УССР в 1966—1967 гг. был создан Карпатский геодинамический полигон, на котором ведутся систематические наблюдения за вариациями физических полей Земли [13].

Несомненно, что данные о взаимосвязи физических полей Земли с глубинной структурой и современной динамикой земной коры, полученные по всей территории Карпатского региона, включая и юго-западное окончание Восточно-Европейской платформы, необходимы также и для интерпретации динамических характеристик, которые ежегодно наблюдаются на территории полигона.

Ранее [4] уже было показано, что гравитационное поле Карпатского региона четко отражает глубинную структуру земной коры этой территории и хорошо коррелируется с поведением границы Мохоровичича вдоль регионального профиля ГСЗ ИГ-III [11]. Это позволило выполнить исследования взаимосвязи геофизических полей с глубинной структурой и современной динамикой земной коры по ряду профилей ГСЗ и повторного нивелирования. Графики зависимостей между геофизическими и динамическими параметрами имеют довольно высокие коэффициенты корреляции, что обусловлено предварительным разделением всей территории на отдельные крупные блоки, в пределах которых исследованы корреляционные связи [4, 5]. Весьма характерно, что во всех блоках Карпатской геосинклинальной области графики имеют один и тот же знак углового коэффициента, а при переходе к древней платформе последний резко меняется на противоположный.

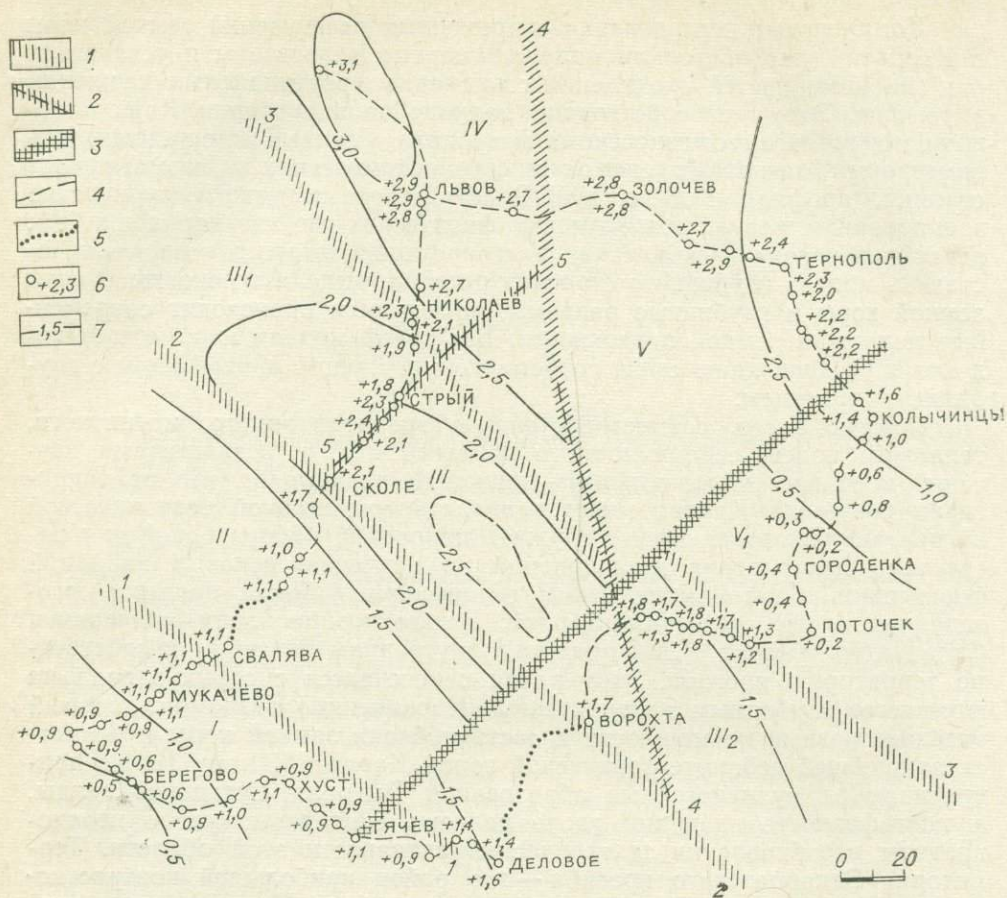


Рис. 1. Схема современных вертикальных движений земной коры Карпат, составленная с учетом геофизических данных.

1 — глубинные разломы; 2 — предполагаемые глубинные разломы; 3 — разлом поверхности кристаллического фундамента; 4 — полигон повторного нивелирования; 5 — разрывы в полигоне; 6 — значения скорости в пунктах полигона, мм/год; 7 — изолинии скорости современных вертикальных движений земной коры, мм/год.

На основе метода количественного прогнозирования по регрессионным зависимостям между H (глубина до Мохо) и $\Delta g_{\text{оср}}$ (осредненное радиусом 20 км поле аномалий Буге), а также v (скорость современных вертикальных движений земной коры) и $\Delta g_{\text{оср}}$ построены схемы изоглубин поверхности Мохоравичича и современных вертикальных движений земной коры Карпатского региона [6].

Схема современных вертикальных движений, составленная с учетом геофизических данных (рис. 1), дает возможность непосредственно сопоставить количественные данные о скорости современных деформаций земной поверхности с блоковой структурой земной коры региона, так как она построена на основе внутриблочных зависимостей между скоростными и геофизическими параметрами. Последнее позволяет уточнить пространственное распределение значений скорости современных деформаций между линиями повторного нивелирования и даже для их прогноза.

Для большей наглядности на рис. 2 совмещены схема современных вертикальных движений и схема изоглубин поверхности Мохоравичича, по которым дается анализ структуры этой поверхности и современной динамики земной коры для основных геоструктурных элементов Карпатского региона.

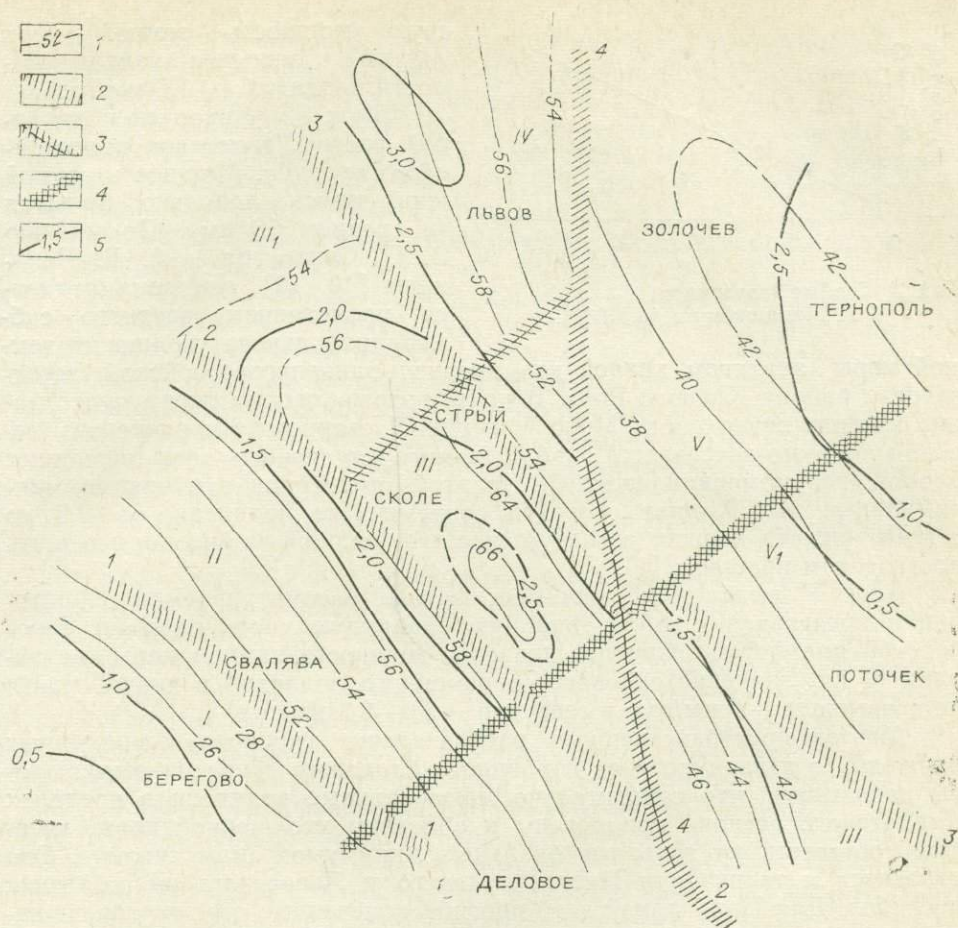


Рис. 2. Схема изоглубин поверхности Мохо и современных вертикальных движений земной коры Карпат.

1 — линии изоглубин до раздела М, км; 2 — глубинные разломы; 3 — предполагаемые глубинные разломы; 4 — разлом поверхности кристаллического фундамента; 5 — изолинии скорости современных вертикальных движений земной коры, мм/год.

Блок I — западный, окраинный блок земной коры региона, соответствующий Закарпатскому внутреннему прогибу, имеет наименьшую для советских Карпат мощность земной коры — 26 км. Среднее значение скорости современного поднятия этой территории составляет $\pm 0,8$ мм/год.

Блок II расположен восточнее глубинного Закарпатского разлома и соответствует складчатой флишевой области Карпат. Поверхность Мохо здесь резко погружается с амплитудой порядка 20 км. Среднее значение мощности земной коры 55 км, а среднее значение скорости современного поднятия $+1,75$ мм/год.

Блок III пространственно приурочен к зоне Предкарпатского прогиба и характеризуется наибольшей в советских Карпатах мощностью земной коры. Для него характерна поперечная зональность в изменении мощности земной коры и скорости современных движений. Максимальное значение мощности земной коры центральной части блока до 66 км, а скорость современного поднятия равна $+2,5$ мм/год. Севернее, за Стрыйским разломом, мощность земной коры и скорость современных движений уменьшаются соответственно до 55 км и $+2,0$ мм/год. Южная часть Предкарпатского прогиба имеет еще мень-

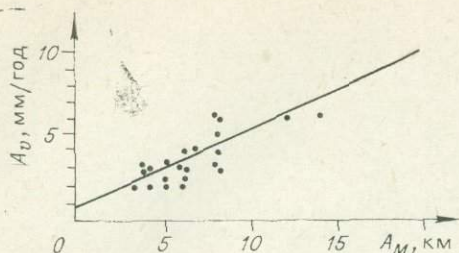


Рис. 3. График зависимости A_v от A_m (по В. А. Магницкому и др., 1973).

ной коры, аналогом корней гор древней раннепротерозойской складчатости района Кривого Рога. В пользу этого говорит смена простирання изогипс поверхности Мохо и изолиний скорости с карпатского (северо-запад-юго-восточного), наблюдаемого для первых трех описанных блоков, на субмеридиональное. На этой территории отмечаются максимальные для Карпат скорости современного поднятия от 2,5 до 3,0 мм/год, что хорошо согласуется с его высокой мобильностью в геологическом прошлом [1].

Блок V выделен на крайнем востоке рассматриваемой территории и представляет собой западную окраинную часть Восточно-Европейской платформы. Среднее значение мощности земной коры составляет 40 км, значение скорости современного поднятия в южной части не превышает +1 мм/год, в северной +2,0—2,3 мм/год.

Анализ пространственного распределения скорости современных движений в зависимости от глубинного блокового строения земной коры показывает, что относительно максимальные поднятия в пределах Карпатского региона приурочены к областям утолщенной коры, которым соответствуют зоны региональных минимумов силы тяжести. Это относится к территории Предкарпатского и Львовского палеозойских прогибов. Для Предкарпатского прогиба отмеченные соотношения между мощностью земной коры и скоростью современных вертикальных движений сохраняются и по простиранию прогиба. Центральная, наибольшая по мощности земной коры (до 66 км) область прогиба (III), ограниченная с севера Стрыйским глубинным разломом, а с юга разломом по линии Тячев — Надворная, имеет значение скорости современных движений земной коры до 2,5 мм/год, тогда как южный блок прогиба (III₂) при мощности земной коры порядка 42 км имеет среднее значение скорости современного поднятия 1,7—1,8 мм/год.

Аналогичные соотношения между мощностью земной коры и скоростью современных деформаций отмечаются в Карпатах на территории Чехословакии. Здесь, в области Восточнословацкой низменности, где толщина коры достигает 24—28 км, земная кора испытывает погружение, а в районе Высоких Татр, где толщина коры 40—44 км, фиксируется современное поднятие земной поверхности [3].

Прямая зависимость между амплитудой скоростей современных движений и амплитудой изменения поверхности Мохоровичича была обнаружена и в других регионах [2]. На рис. 3 приведен уточненный вариант этой зависимости из работы [8], где по оси ординат отложены абсолютные значения амплитуд разности скоростей движений между блоками (A_v), а по оси абсцис — абсолютные значения разности глубин поверхности Мохоровичича (A_m). Очевидно, в настоящее время еще трудно однозначно интерпретировать и указать на причины отмеченной закономерности, хотя уже можно считать, что она выражает какую-то любопытную, но еще недостаточно понятную физическую особенность литосферы.

шую мощность земной коры (44 км) и меньшее значение скорости поднятия (+1,5 мм/год).

Блок IV приурочен к западной части Львовского палеозойского прогиба. Мощность земной коры здесь довольно большая (в среднем 56 км). По мнению В. Б. Соллогуба и А. В. Чекунова [10, 12], эта зона является проявлением древнего субмеридионального утолщения зем-

Вместе с тем описанная выше особенность соотношений между мощностью земной коры и скоростью современных вертикальных движений, видимо, не является универсальной и характерна лишь для определенных участков земной коры, скорее всего для горных геосинклинальных областей. Так, на нашей схеме (см. рис. 2) отчетливо видно, что такие соотношения не отмечаются на территории, расположенной восточнее глубинного Радеховского разлома (линия 4—4). Этот участок древней дорифейской платформы при небольшой мощности земной коры имеет достаточно высокие значения скорости современных вертикальных движений (до 2,5—2,7 мм/год). Имеющиеся геолого-геодезические данные пока не позволяют объяснить такую относительно высокую активность, казалось бы, стабильного, консолидированного участка земной коры. В то же время в юго-восточной части Восточно-Европейской платформы (блок V_1 значения скорости современных движений минимальны (в среднем +0,5 мм/год). Очевидно, разлом по линии Тячев — Надворная разделяет всю окраинную часть платформы на два блока: северный (район Тернополя — Золочева) испытывает поднятие, южный (район Поточек — Городенка) практически стабилен.

Учитывая, что для Карпатской геосинклинальной области характерны прямые соотношения между мощностью земной коры и скоростью современных вертикальных движений, представляет интерес роль изостатического фактора в современной динамике земной коры Карпат. Такой анализ выполнен на основе изучения соотношений между мощностью земной коры, рельефом дневной поверхности, полем силы тяжести в редукции Буге, изостатическими аномалиями и расчетами по уравнению гидростатического равновесия [9]. Полученные данные показали, что равновесие блоков земной коры нарушено в неравной степени. Направленность современных движений на территории Складчатых Карпат и Предкарпатского прогиба совпадает с направлением действия изостатических сил, так как для равновесного состояния земной коры необходимо поднятие рельефа до 3 км. Причем, устойчивое поднятие Складчатых Карпат наблюдается с начала неогена, а Предкарпатского прогиба — с верхнего миоцена. Отсутствие очагов землетрясений и нормальный тепловой поток позволяют считать этот район тектонически спокойным, поэтому современные вертикальные движения земной коры здесь могут быть обусловлены силами Архимеда.

На территории Закарпатского прогиба отмечается разнонаправленность изостатических сил компенсации и современных вертикальных движений земной коры. Если принять во внимание наличие только изостатических сил, то в настоящее время должно наблюдаться опускание земной поверхности. В действительности, начиная с голоцена (примерно в течение 10—15 тыс. лет) [1] и до настоящего времени, поверхность Закарпатского прогиба поднимается, а следовательно, земная кора все больше отклоняется от равновесного положения. Это позволяет допустить преобладание тектонических сил, обусловленных глубинными процессами над изостатическими. Последнее подтверждается сейсмичностью территории, особенностями геотермического режима. О наличии зон активизации земной коры свидетельствуют также и выявленные на Карпатском геодинамическом полигоне аномалии векового хода, которые являются своеобразными индикаторами областей интенсивных коровых процессов [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гофштейн И. Д. Неотектоника Карпат. Киев, Изд-во АН УССР, 1954.
2. Донабедов А. Т., Сидоров В. А. Соотношение между современными вертикальными движениями земной коры, геофизическими полями и геоструктурными элементами на

- юго-западе Русской платформы.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1968.
3. Квиткович И., Планчар И. Морфолого-геофизические проявления современных движений земной коры в области Восточной Словакии. (Материалы Международного симпозиума по изучению современных движений земной коры на геодинамических полигонах ЧССР). Смолынице, 1974.
 4. Кузнецова В. Г. О геофизических исследованиях на Карпатском геодинамическом полигоне.— В кн.: Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. Алма-Ата, «Ылым», 1973.
 5. Кузнецова В. Г. Использование геофизических данных для составления карты современных вертикальных движений земной коры западной части Украины.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
 6. Кузнецова В. Г. Изучение современных движений земной коры геофизическими методами (на примере советских Карпат). Автореф. канд. дис. М., 1974.
 7. Кузнецова В. Г., Мельничук М. И. Магнитометрические исследования на Карпатском геодинамическом полигоне. (Материалы IX конференции по постоянному геомагнитному полю и палеомагнетизму). Вып. 1. Баку, Изд-во АН АзССР, 1973.
 8. Магницкий В. А., Калашникова И. В., Сидоров В. А. Некоторые особенности современных вертикальных движений земной коры и проблемы их интерпретации.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
 9. Собакарь Г. Т., Сомов В. И., Кузнецова В. Г. Современная динамика и структура земной коры Карпат и прилегающих территорий. Киев, «Наукова думка», 1975.
 10. Соллогуб В. Б. Структура земной коры Украины.— В кн.: Геофизический сборник АН УССР. Вып. 38. Киев, «Наукова думка», 1970.
 11. Соллогуб В. Б., Чекунов А. В., Павленкова Н. И., Гаркаленко И. А., Чирвинская М. В., Турчаненко Н. Т. и др. Основные результаты и проблемы изучения глубинного строения земной коры Украины сейсмическими методами.— В кн.: Геофизический сборник АН УССР. Вып. 38. Киев, «Наукова думка», 1970.
 12. Чекунов А. В. Структура земной коры и тектоника юга европейской части СССР. Киев, «Наукова думка», 1972.
 13. Гофштейн Т. Д., Сомов В. Т., Кузнецова В. Г. Вивчення сучасних рухів земної кори в Карпатах. Київ, «Наукова думка», 1971.

Х. Х. Сильдвээ, А. А. Мийдел

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЭСТОНИИ

По новейшим данным [1], преобладающая часть территории Эстонии поднимается со скоростью до 2,2 мм/год и лишь крайняя юго-восточная часть опускается со скоростью до 1,0 мм/год (рис. 1). Изобазы современных движений земной коры, имеющие северо-восточное простирание, расположены на территории республики неравномерно. На старой схеме [2] по линии Пярну—Тапа была намечена полоса сгущения изобаз шириной 30—40 км, где скорость поднятия резко увеличивалась от 1 до 2 мм/год (рис. 2). На новой схеме [1] названная полоса вырисовывается слабее. На этой же схеме выделяется еще ряд зон относительно повышенных градиентов современных движений, например, по линии Пярну—Йыгева, Тырва—Тарту, Мынисте—Вынну (см. рис. 1). Судя по названным зонам, современные движения в юго-восточной части Эстонии происходят скачкообразно.

По новой схеме современных движений [1] территория Эстонии разделяется на две крупные части. Граница между ними, хотя не совсем ясна, имеет северо-восточное простирание. Нельзя не отметить, что по этой же схеме юго-восточная часть территории испытывает значительно более интенсивные по амплитуде движения (от —1,0 до +1,0 мм/год), чем северо-западная (от 1,0 до 2,0 мм/год). Интересно, что область более интенсивных по амплитуде современных движений тяготеет в общих чертах к выходу девонских отложений от линии Пярну—Йыгева на юго-восток.

С целью интерпретации схемы современных движений земной коры было проведено ее сравнение со схемами поверхности фундамента, блокового строения и гравитационного и магнитного полей. Поверх-

ность фундамента на территории Эстонии погружается в общем на юг, но изобазы современных движений земной коры простираются с северо-востока на юго-запад независимо от рельефа поверхности фундамента.

Общий план современных движений земной коры на территории Эстонии не согласуется с известными крупными структурными единицами как Новгородский массив и Белорусско-Балтийская зона складчатых систем, между которыми располагается Псковско-Пальдиская зона гравитационных и магнитных аномалий и связанные с ней глубинные разломы северо-западного простирания [8].

В юго-восточной и северо-западной частях территории республики наблюдаются относительно интенсивные региональные положительные аномалии силы тяжести (см. рис. 2). По геодезическим данным юго-восточный район опускается, а северо-западный поднимается.

Исходя из данных толщины земной коры в Южной Финляндии [11] и учитывая сходство физических полей на обеих территориях, можно полагать, что на территории Эстонии толщина земной коры существенно не колеблется. На основе этого кажется весьма вероятным, что между общим планом современных движений и толщиной земной коры в Эстонии четко выраженной связи нет.

После сравнения схемы современных движений земной коры с блоковым строением кристаллического фундамента или с расположением блоков, выделенных Э. Ряхни [9], нетрудно прийти к выводу об отсутствии между ними сколько-нибудь ясной связи (см. рис. 1). Общие черты блокового строения кристаллического фундамента проявляются в палеозойских движениях гораздо лучше, чем в современных.

Как известно, на фоне общего наклонного поднятия, являющегося частью сводового поднятия Фенноскандии, в Эстонии происходят и дифференцированные движения. Они выражаются прежде всего в сгущении изобаз и, кроме того, обнаруживаются анализом графиков повторного нивелирования. Сопоставление геодезических и геолого-геофизических данных показывает, что дифференциально-блоковые движения приурочены нередко к зонам разломов, выделяемых по геофизическим данным [10]. Из зон сгущения изобаз, имеющих обычно северо-восточное простирание, некоторые отражают, вероятно, разрывные нарушения, развитые в палеозойских породах и, возможно, в кристаллическом фундаменте. Прежде всего это относится к полосе сгущения изобаз современных движений по линии Пярну-Тапа (см. рис. 1, 2), частично совпадающей с тектоническими нарушениями, установленными по геологическим и геоморфологическим данным [4, 6, 10]. В этой зоне расположен также ряд участков с резкими смещениями реперов. К ней же приурочены еще положительные и отрицательные остаточные гравитационные аномалии, опоясанные значительными градиентами силы тяжести [10]. Сущность других зон сгущения изобаз, например по линии Тырва — Тарту и Мынисте — Вынну, не совсем ясна. Известно, что зона Тырва — Тарту пересекает нижнее течение р. Вяйке-Эмайыги, где в голоцене происходила значительная аккумуляция аллювиальных отложений [3, 4]. Судя по пологому продольному профилю р. Вяйке-Эмайыги и заболоченной долине в ее нижнем течении, этот процесс продолжается, вероятно, и в современное время. По геофизическим данным, в районе нижнего течения р. Вяйке-Эмайыги развит разлом северо-восточного простирания, но никаких других данных, например геологических, подтверждающих наличие в этом районе разрывных нарушений, пока нет. Еще меньше данных о наличии тектонических нарушений по линии сгущения изобаз Мынисте — Вынну. Как известно, Мынисте расположено на Локновском поднятии кристаллического фундамента, и на его северном склоне установлен субширотный разлом (см. рис. 1), а тектонических нарушений северо-

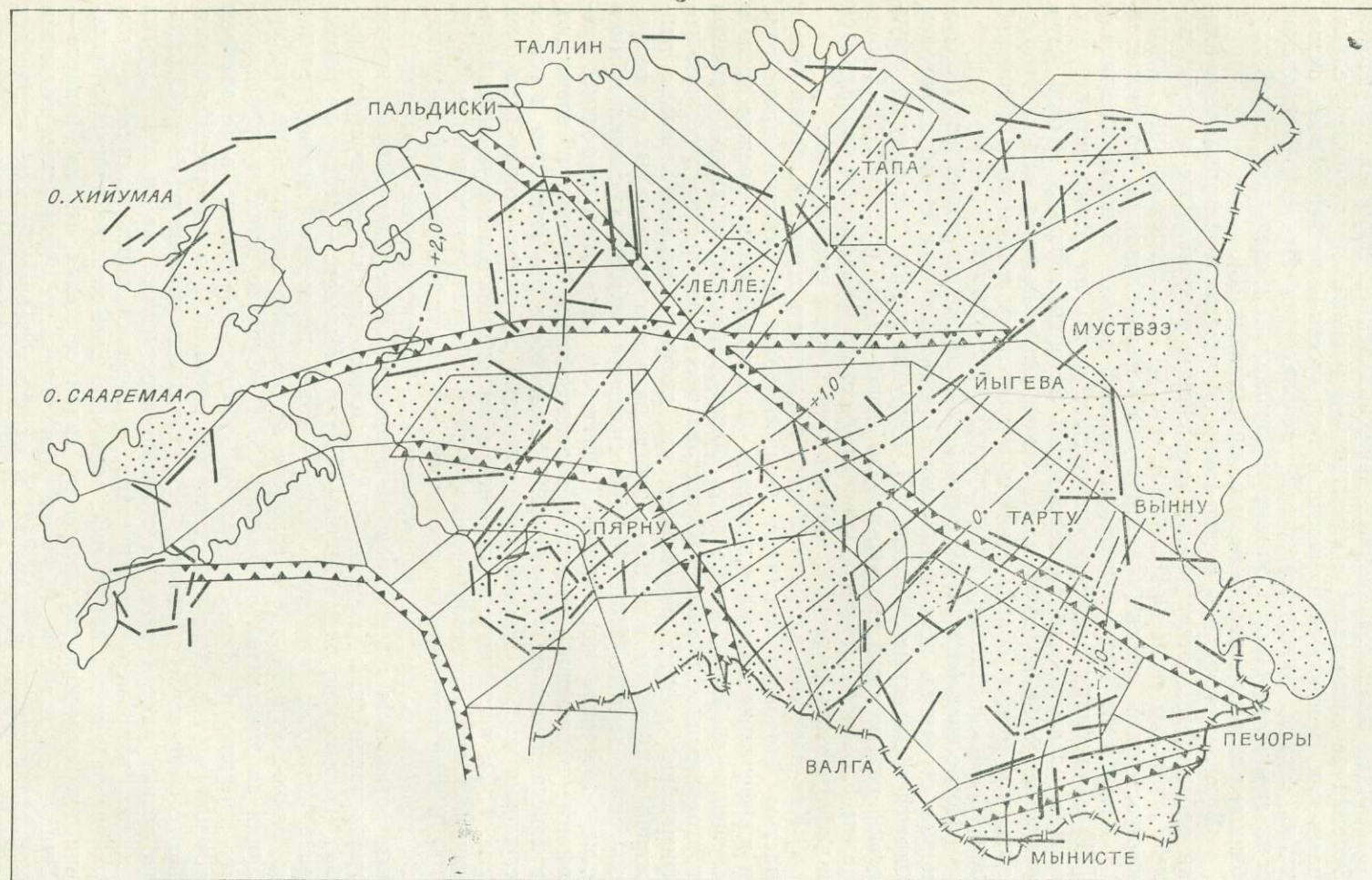


Рис. 1. Блоковое строение и современные вертикальные движения.

1 — блоки фундамента по геофизическим данным; 2 — блоки осадочного чехла по геоморфологическим данным [9]; 3 — глубинные разломы по геофизическим данным; 4 — изолинии современных вертикальных движений, мм/год [1].

восточного или субмеридионального простираения там не наблюдается. По смещениям реперов предполагается, что именно субширотный разлом — «живущий» [10].

На трассах повторного нивелирования, пересекающих зоны глубинных разломов, в ряде мест установлены смещения группы реперов, которые, по всей вероятности, можно связывать с подвижками, происходящими в этих зонах. К таким зонам глубинных разломов следует отнести субширотную зону о. Сааремаа — Муствэе, Псковско-Пальдинскую зону и дугу разломов в юго-западной Эстонии (см. рис. 1, 2). Здесь следует отметить, что реальность активности этих глубинных разломов в поздне- и послеледниковое время, по данным изучения древнебереговых образований, может быть поставлена под сомнение. С другой стороны, достаточно продолжительный промежуток времени между нивелированиями (20—30 лет) и установление смещения реперов на одних и тех же участках должны как будто исключить возможности воздействия случайных, например, экзогенных факторов.

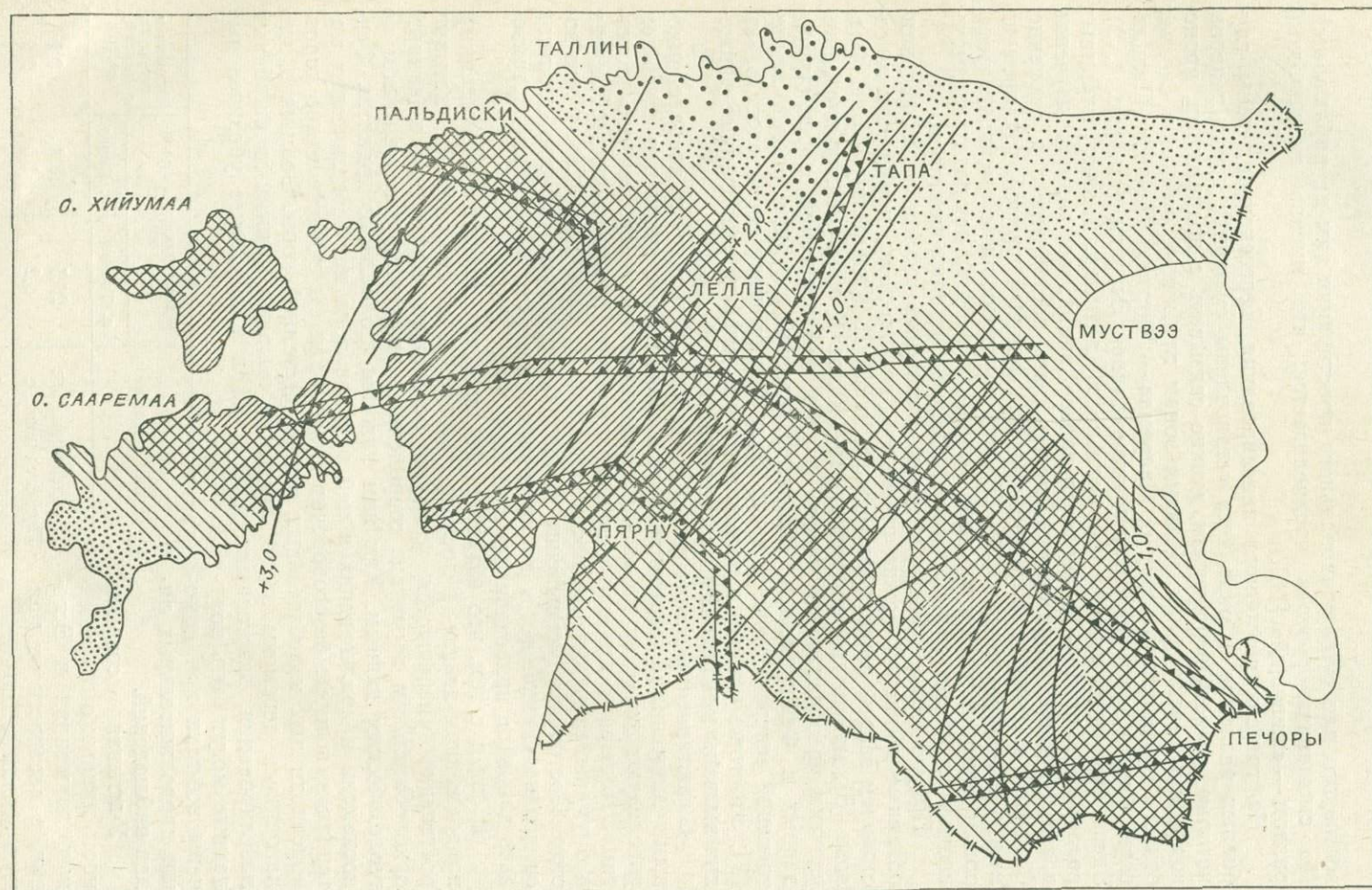
Приуроченные обычно к зонам глубинных разломов дифференцированные движения можно объяснить, по-видимому, напряженным состоянием земной коры, достигающим, по П. Н. Кропоткину и Б. Н. Фролову [5], максимума на глубине 10—40 км. К этим же глубинам приурочена преобладающая часть очагов землетрясений, зарегистрированных в Фенноскандии. Например, средняя глубина очагов землетрясений северо-восточной части Балтийского щита составляет 25,4 км [7]. Это тоже говорит в пользу того, что дифференцированные движения вызваны напряженным состоянием земной коры.

Сопоставление современных движений с поздне- и послеледниковыми движениями показывает, что современные движения в общем унаследуют характер поздне- и послеледниковых суммарного поднятия. Это выражается как в почти одинаковом простираении изобаз, так и в уменьшении интенсивности поднятия от северо-запада на юго-восток. Постоянное уменьшение поднятия территории Эстонии, начиная от послеледниковой и до настоящего времени, можно характеризовать данными, приведенными в таблице [4].

В связи с тем, что современные движения являются естественным продолжением поздне- и послеледниковых движений, скорость которых постепенно уменьшается, следует осторожно относиться к данным о колебательном характере современных движений, установленном по геодезическим данным. Как нам кажется, по области поднятия Фенноскандии и прилегающих к ней районов пока нет геодезических материалов, которые безоговорочно доказывали бы существование короткопериодических колебательных движений земной коры. Возможно, что кажущиеся перемены знака движений вызваны какими-то ошибками нивелирования, экзогенными причинами и т. п. Самые убедительные данные могут быть получены все-таки при помощи продолжительных рядов наблюдений.

Учитывая совокупность данных о современных движениях в Эстонии, в частности их прямую связь с поздне- и

Время поднятия	Средняя скорость поднятия, мм/год		Разница в скорости поднятий, мм/год
	г. Таллин	г. Пярну	
Позднеледниковые	26,5	18,4	8,1
Послеледниковые	4,2	1,0	3,2
Современное . . .	1,7	1,3	0,4



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

Рис. 2. Гравитационное поле и общее поднятие территории.

1—5 — участки со значениями гравитационного поля: 1 — низкими, 2 — пониженными, 3 — нулевыми, 4 — повышенными, 5 — высокими; 6 — изолинии современных вертикальных движений, мм/год [2]; 7 — глубинные разломы.

последледниковыми движениями, следует предположить, что гляцио-изостатический фактор еще не утратил своего значения в проявлении современных движений. Это значит, что современные движения регионального характера, по-видимому, связаны с процессами, происходившими на больших глубинах и являющимися общими для всей области поднятия Фенноскандии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валлиер Л. А., Желнин Г. А. Новая карта изобаз территории ЭССР.— В кн.: Современные движения территории Прибалтики. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1975.
2. Желнин Г. А. Точность и возможности метода повторного нивелирования.— В кн.: Современные и новейшие движения земной коры в Прибалтике. Вильнюс, 1964.
3. Каяк К. Ф. Геология долины реки Вайке-Эмайги.— «Уч. зап. ТГУ», вып. 75. Тарту, 1959.
4. Кессел Х., Мийдел А. А. О поздне- и последледниковых движениях земной коры на территории Эстонии.— «Изв. АН ЭССР. Хим. Геол.», 1973, № 23.
5. Кропоткин П. Н., Фролов Б. Н. Напряженное состояние и сколовые деформации в коре и верхней мантии.— В кн.: Физические свойства, состав и строение верхней мантии. «Наука», 1974.
6. Орвику К. К. О неотектонических движениях в Эстонской ССР на основе геологических данных.— В кн.: Неотектонические движения в Прибалтике. Тарту, 1960.
7. Панасенко Г. Д. Сейсмические особенности северо-востока Балтийского щита. Л., «Наука», 1969.
8. Побул Э. А., Сильдвэз Х. Х. О блоковом строении кристаллического фундамента Эстонии.— В кн.: Современные движения территории Прибалтики. Тарту, 1975.
9. Ряхни Э. О блоковых неотектонических движениях на территории Эстонии.— «Изв. АН ЭССР. Хим. геол.», 1973, № 24.
10. Сильдвэз Х. Х., Мийдел А. А., Желнин Г. А. К проблеме дифференциации современных движений земной коры Эстонии.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
11. Penttilä E. Crustal structure in Fennoscandia from seismological and gravimetric observations.— «Ann. Acad. Sci., Fennicae», AIII, 110, 1972.

А. А. Торим

О РАЗВЕРТЫВАНИИ РАБОТ ПО ИЗУЧЕНИЮ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЭССР

Изучение современных вертикальных движений земной коры ведется на территории Эстонии методом повторного нивелирования уже давно. Проложено более 2500 км повторных ходов. В последние годы особое внимание уделялось систематическому детальному изучению характера происходящих движений. Было создано два небольших

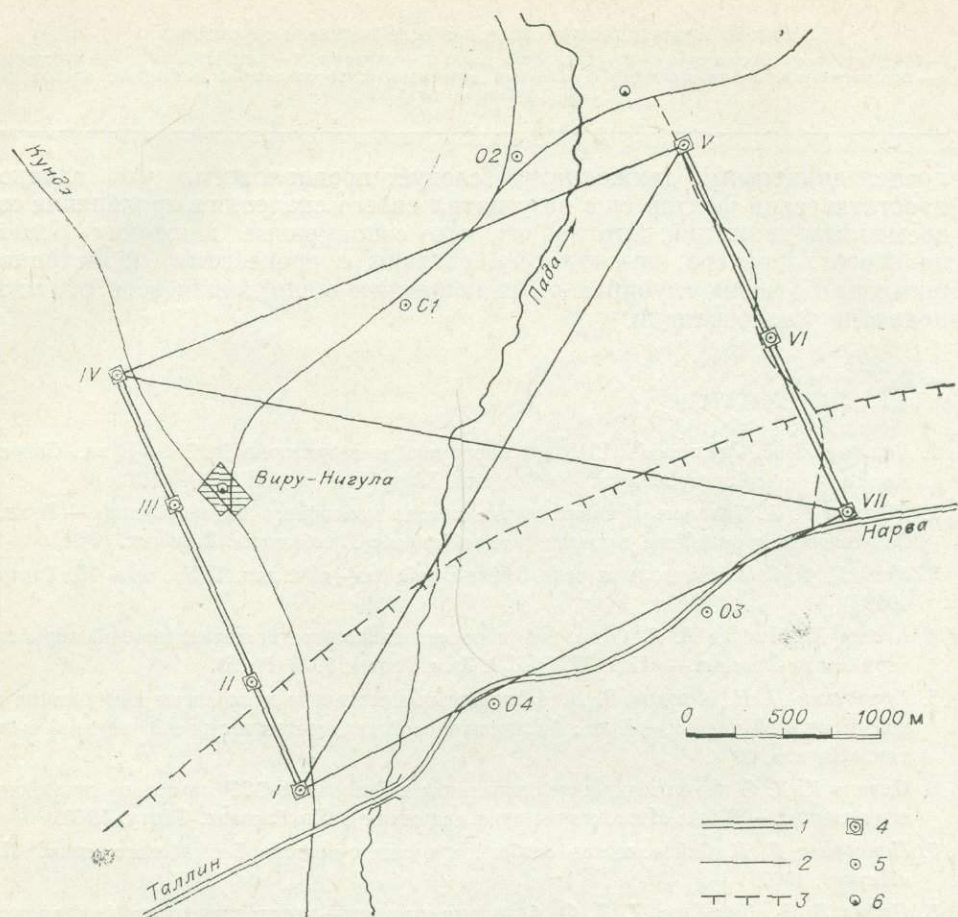


Схема геодинимического полигона Виру-Нигула.

1 — базисная линия; 2 — линии, измеренные светодальномером; 3 — Азерский разлом; 4 — центр линейных измерений (он же репер); 5 — грунтовой и 6 — стенной реперы.

геодинимических полигона — один в центральной Эстонии (Навести), второй на о. Хийумаа (Паукюла) [2].

В 1974 г. приступили к созданию в северной Эстонии вблизи пос. Виру-Нигула (северо-восточнее г. Раквере) еще одного полигона, предназначенного для одновременного изучения горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности. При выборе района полигона учитывались рекомендации геологов и геофизиков, а для целесообразного геодезического построения — природные условия местности. Полигон разбит в районе Азерского геологического разлома, рассматриваемого нами как стык двух блоков.

Азерский глубинный разлом относится по простираию к северо-восточным разрывным нарушениям кристаллического фундамента и отделяет блоки, имеющие различные плотности [3, 4]. Осадочный покров изученного района несложный, в основном состоит из плотных пород (мергель, известняк, песчаник) и имеет мощность около 200—250 м. В таких условиях тектонические деформации не должны испытывать сложных трансформаций в осадочном покрове и распространяться далеко от места непосредственно тектонического воздействия.

Можно ожидать, что контуры тектонически активных зон кристаллического фундамента будут совпадать с полосами проявления современных движений поверхностных слоев земной коры и непосредственно отражать действительную границу двух земных блоков.

Для изучения горизонтальных смещений земной поверхности намечено геодезическое построение в виде четырехсторонника (четыреугольника) с длинами сторон 2—3 км (см. рисунок). Две стороны четырехсторонника, секущие разлом, предусмотрены для базисных измерений. Первый базис закреплен четырьмя центрами (разбит на 3 части), второй — тремя (на 2 части). По периметру (13 км) полигона кроме центров построения, используемых и как высотные знаки, заложено еще четыре грунтовых и один стенной репер. Центры и грунтовые реперы закладывались бурением на глубину 2—6 м с углублением в плитняк на 0,5—1,5 м.

Грунтовые знаки закладывались в виде асбоцементной трубы диаметром 100 мм, заполненной цементным раствором и арматурой. Для лучшего сцепления асбоцементной трубы с плитняком последняя устанавливалась на 0,5 м выше дна буровой скважины. В верхний конец асбоцементной трубы (приблизительно 0,3—0,5 м ниже поверхности земли) укреплялся бронзовый репер (он же центр). Наружное оформление пунктов — обычное (в виде кургана).

Летом 1974 г. оба базиса были измерены инварными проволоками с точностью работ 1-го класса, по секциям длиной 600—1000 м. Длина первого базиса 2,4 км, второго — 2,1 км. Говорить о полученной точности базисных измерений мы пока воздержимся, поскольку длина двух использованных в работе проволок, согласно данным второго компарирования, изменилась. Это вынуждает нас повторить измерения.

В конце 1974 г. с участием сотрудников Института вулканологии ДВНЦ АН СССР под руководством В. Б. Энмана были измерены все стороны и диагонали четырехсторонника светодальномером СГ-3. Выполненные измерения должны послужить исходными данными для последующих повторений при изучении относительных горизонтальных смещений двух земных блоков.

Кроме линейных измерений (трилатерация) планируется выполнение точных угловых измерений (микротриангуляция) и определение азимута одной из сторон. Это даст возможность получить независимые и взаимно контролируемые данные о горизонтальных смещениях в пределах определенного геодинамического полигона.

Периодическое повторение линейно-угловых измерений позволит детально изучить горизонтальное смещение одного блока относительно другого. Поскольку нам пока неизвестна скорость смещения разделенных разломом блоков, то планировать частоту повторений весьма затруднительно. По имеющимся сведениям, относительная скорость современных вертикальных движений земной поверхности Эстонии для участка в 100 км составляет 0,5—1,0 мм/год. Если принять, что скорость горизонтальных движений в изучаемом районе такая же, то думается, что даже в случае измерений с наивысшей точностью про-

межуток времени между повторениями должен быть не менее 6—7 лет. Естественно, что пробные измерения мы выполним раньше, ориентировочно через три года. Высотную связь центров и реперов полигона, в целях изучения вертикальных движений земной поверхности, предполагается повторять по программе нивелирования 1-го класса через три года.

В заключение отметим, что основные цели наших исследований на геодинамическом полигоне Виру-Нигула: 1) установить «живет» ли Азериский разлом в настоящее время (имеющиеся геодезические и геофизические данные пока не позволяют этого установить); 2) какова скорость и направление горизонтальных и вертикальных относительных смещений блоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валлер Л. А., Желнин Г. А. Новая карта территории ЭССР.— В кн.: Современные движения территории Прибалтики. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1975.
2. Валлер Л. А., Торим А. А., Сильдвэз Х. Х. Геодинамические миниполигоны на территории ЭССР.— В кн.: Современные движения территории Прибалтики. Тарту, 1975.
3. Побул Э. А., Сильдвэз Х. Х. О разрывных нарушениях кристаллического фундамента Эстонии.— «Изв. АН ЭССР. Хим. геол.», 1973, т. 22, № 1.
4. Побул Э. А., Сильдвэз Х. Х. О блоковом строении кристаллического фундамента Эстонии.— В кн.: Современные движения территории Прибалтики. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1975.

В. М. Яковлев, М. Т. Козлов, Г. Д. Панасенко

О ПРИРОДЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОТРЕЗКЕ АПАТИТЫ — ТИТАН ЛИНИИ ПОВТОРНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ КОЛЬСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Линия Тикозеро — Кукисвумчорр повторного нивелирования Кольского геодинамического полигона заложена в 1966 г. вдоль линии государственного нивелирования 1947 г. Отрезок линии Апатиты — Титан приурочен к осадочной вулканогенной сильно метаморфизированной протерозойской серии Имандра — Варзуга, окаймляющей Хибинский горный массив с юга и запада (рис. 1). Он вытянут в субширотном направлении, близком к простиранию горных пород.

В 1966—1972 гг. здесь проводилось ежегодное нивелирование, а в 1971 г. он нивелировался трижды — 24—27 мая, 9—15 июля и 24—26 августа.

Анализ графиков повторных нивелирований (см. рис. 1, 2) показывает, что в отдельных пунктах расхождения между нивелированиями разных лет превышают возможные ошибки наблюдений. Исследованиями 1966—1970 гг. выявлена тенденция относительного опускания

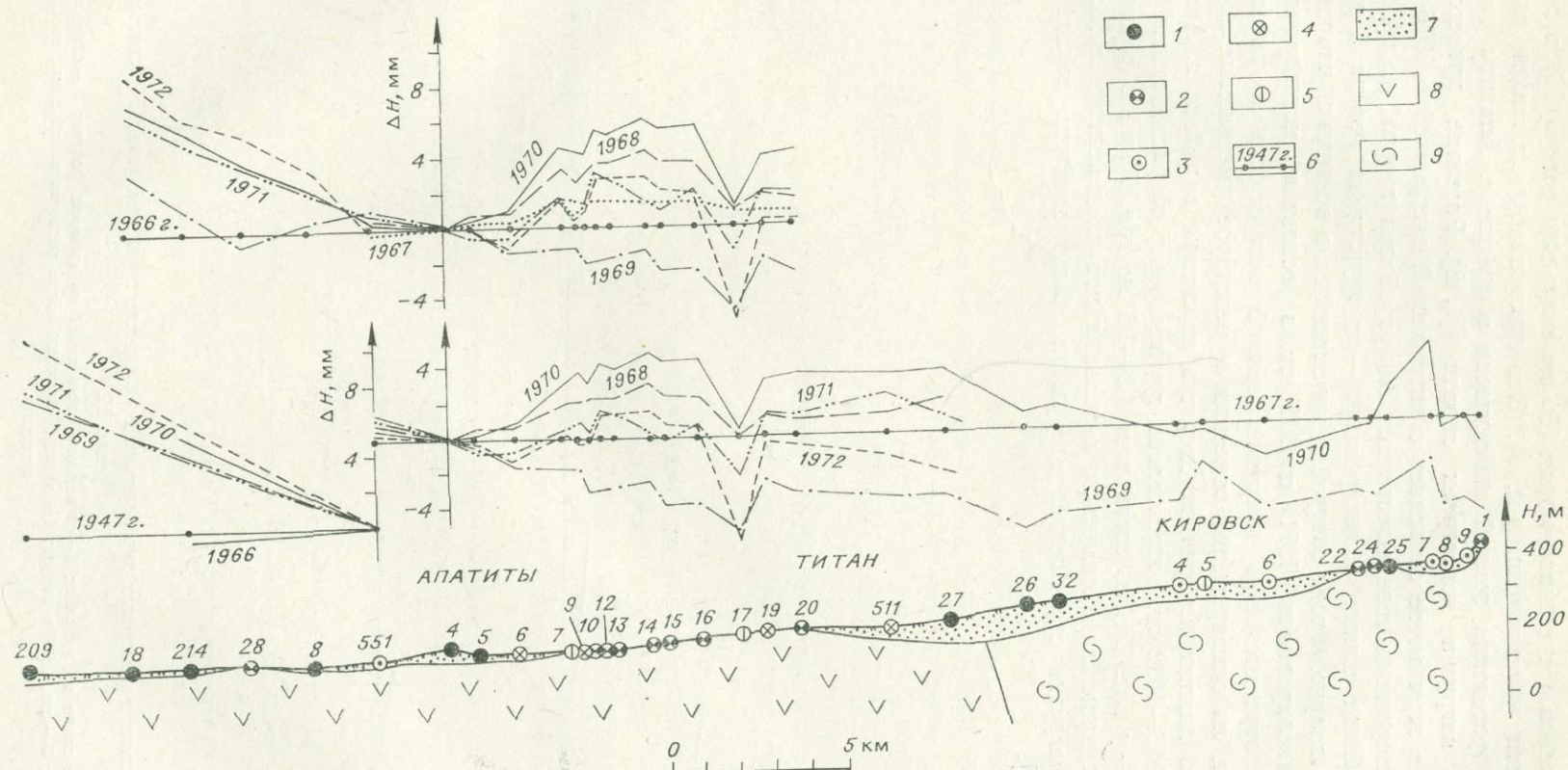


Рис. 1. Результаты повторных нивелирований и схематический геологический разрез по линии Тикозеро—Кукисвумчорр (участок Апатиты—Титан от стенной марки 551 до грунтового репера 27).

1—грунтовые и 2—скальные реперы; 3—стенные марки; 4—реперы в валунах; 5—знаки в железобетонных сооружениях; 6—исходное нивелирование; 7—четвертичные отложения Q; 8—эффузивно-осадочный комплекс пород Имандро-Варзугской структурной зоны Pt; 9—интрузивный комплекс щелочных пород Хибинского горного массива Pz.

группы реперов (от стенной марки 551 до скального репера 16) в западной части участка (см. рис. 1). Это послужило основанием для вывода о проседании земной поверхности в районе г. Апатиты под действием нагрузки новостроек города [1, 2]. Развитие процесса опускания в этом месте совпадает с интенсивной застройкой в 1966—1969 гг. северных и северо-восточных микрорайонов города, расположенных вблизи линии нивелирования — от грунтового репера 5 до репера 6 в валуне. Фронт застройки перемещался в восточном направлении. Нивелирования 1971 и 1972 гг. в основном подтвердили вывод об отрицательном движении земной поверхности в районе г. Апатиты, но одновременно отметили и некоторое уменьшение скорости этого движения. Средняя скорость опускания в районе г. Апатиты за 1966—1972 гг. относительно группы реперов, расположенных восточнее — у пос. Титан, составляет 1,0—1,5 мм/год. Ранее в районе г. Апатиты прогибание скального основания под воздействием возрастающей нагрузки строящегося сооружения было отмечено наклономерами [3].

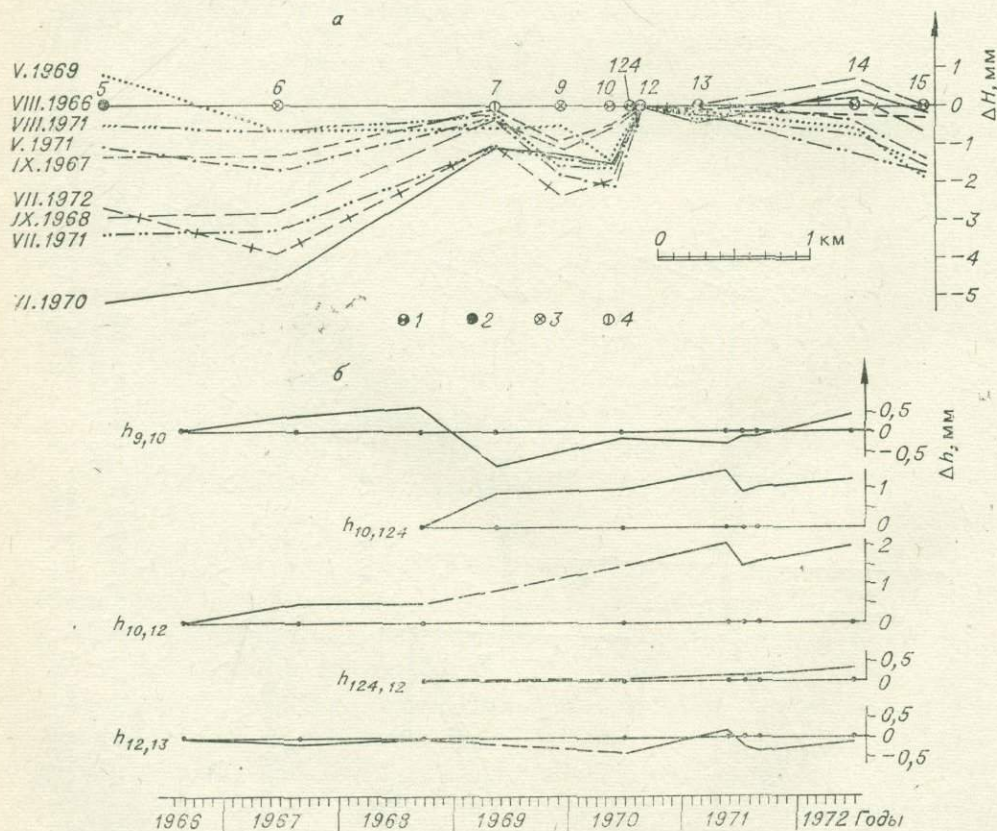


Рис. 2. Результаты повторных нивелирований на участке грунтовой репер 5 — скальный репер 15.

a — изменение высот по профилю; *b* — изменение превышений во времени. Реперы: 1 — скальный; 2 — грунтовой; 3 — скальный в валуне; 4 — в железобетонной опоре высоковольтной линии электропередачи.

В 1972 г. началась интенсивная застройка западных микрорайонов города, где проходит часть рассматриваемого отрезка линии нивелирования — от стенной марки 551 до грунтового репера 4. Ожидается, что последующие нивелирования зафиксируют здесь увеличение скорости опускания земной поверхности.

Нивелированиями 1971 и 1972 гг. относительно уровня 1970 г. отмечено опускание другой группы реперов — от репера 19 в валуне до грунтового репера 27 (см. рис. 1). Во второй половине 1970 г. началось заполнение хвостохранилища местной обогатительной фабрики, сооруженного у пос. Титан, близ линии нивелирования. В хранилище ежегодно поступает около 5 млн. т минеральных отходов обогатительного процесса. Поскольку заполнение хвостохранилища будет происходить примерно с такой же интенсивностью еще ряд лет, можно предполагать, что дальнейшее опускание этой группы реперов сохранится при условии, что наше предположение о природе отрицательного движения реперов у пос. Титан верно.

На рис. 2 изображены графики всех повторных нивелирований, выполненных в 1966—1972 гг. Кривые ΔH построены относительно уровня 1966 г., за исходный принят скальный репер 12 (см. рис. 2, а). Средние квадратические ошибки составляют $\pm 0,25 \div 0,56$ мм/км. Отмечается большой разброс кривых ΔH на участке нивелирной линии, закрепленной знаками разного типа (левая часть графика) по сравнению с той частью, где линия закреплена только скальными реперами (правая часть графика) (рис. 2, б). Это может свидетельствовать о том, что нескальные реперы подвержены сезонным колебаниям, или что в этой части линии происходят более интенсивные знакопеременные движения земной поверхности.

Знаки в искусственных железобетонных сооружениях обычно считаются неустойчивыми. Однако положение горизонтальной марки 7 в опоре линии электропередачи оказалось стабильным относительно скального репера 12. Расхождения лежат в пределах двойной средней квадратической ошибки. В то же время движения репера 9 в валуне относительно реперов 7 и 12 превышают тройную среднюю квадратическую ошибку.

Анализ графика 2, б показал, что разница высотного положения скальных реперов 10 и 12, отстоящих друг от друга на 220 м, за период нивелирований монотонно увеличивалась. За шесть лет она составила 2,0 мм, что дает среднюю скорость изменения превышения $+0,33 (\pm 0,05)$ мм/год. Изменения превышений между другими реперами на рассматриваемом участке имеют колебательный характер. По-видимому, можно говорить об устойчивости скорости относительного движения скальных реперов 10 и 12, а точнее — скальных реперов 10 и 124, так как превышение $h_{124,12}$ с 1968 по 1972 г. оставалось практически неизменным, а превышение $h_{10,124}$ за это время увеличилось на 1,2 мм.

Почти параллельно данному отрезку линии нивелирования проходит в запад-северо-западном направлении зона разлома рифейского заложения, несущая в себе признаки молодой и новейшей тектонической активности. Наиболее значительные ниже- и среднепалеозой-

ские движения по этому разлому сопровождались внедрением щелочных пород. Движения в мезокайнозойское и в послеледниковое время имели блоковый характер с тенденцией поднятия северных блоков. Эти движения привели также к образованию серии оперяющихся сколовых трещин северо-восточного направления. Вполне вероятно, что одна из таких трещин, оперяющихся разлом с севера, проходит между скальными реперами 10 и 12. Характер выявленных здесь современных движений согласуется с общей тенденцией поднятия северных и северо-восточных блоков относительно южных и юго-западных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов В. И., Гусева Т. В., Яковлев В. М. Геодезические и геофизические исследования на Кольском полигоне.— В кн.: Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. Ташкент, «Фан», 1972.
2. Богданов В. И., Гусева Т. В., Никифорова О. Д., Яковлев В. М. Инструментальные данные о современных движениях земной поверхности на Кольском геофизическом полигоне.— В кн.: Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. Алма-Ата. Изд-во АН КазССР, 1973.
3. Панасенко Г. Д. Наблюдение на станции Апатиты наклона, обусловленного прогибом земной поверхности под действием веса возводимого сооружения.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 2. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1965.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Я. В. Наумов

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНАХ СТРОИТЕЛЬСТВА ВЫСОКИХ ПЛОТИН

Создание энергетической базы социалистического производства — одна из неустанных забот партии и народа.

Наряду со строительством атомных и тепловых электростанций для удовлетворения нужд народного хозяйства и потребностей населения планируется и создание широкой сети гидроэлектростанций, в том числе и в высокогорных сейсмоопасных районах (Таджикистан, Узбекистан, Грузия и др.).

В ряде этих районов наблюдаются значительные современные движения земной коры. Понятно, что эти движения уже сами по себе могут оказать существенное влияние на устойчивость плотин ГЭС.

Большое значение может иметь изучение движений земной коры и с точки зрения прогнозирования землетрясений в этих районах. Известно, что во многих странах мира, подверженных опасности землетрясений, особенно в Японии, СССР и США, ведутся обширные исследования по поискам предвестников землетрясений. В эти исследования входят и изучения связей возникновения землетрясений, их силы, места и времени с современными движениями земной поверхности. Как неоднократно указывалось, в изучении этого вопроса уже имеются некоторые успехи. В первую очередь следует упомянуть работы известного советского ученого Ю. А. Мещерякова, который на примере ряда сильных землетрясений установил определенную корреляцию между современными движениями земной коры и возникновением землетрясений, выделив ряд типов движений в сейсмоактивных районах.

Ф. Наоми и Ф. Иохито (Япония) [2] на основе большого количества наблюдений более детально уточнили выводы Ю. А. Мещерякова.

Уже сейчас нет сомнений в том, что между временем, местом и энергией будущего землетрясения и современными движениями земной коры есть тесная связь.

В настоящее время установлен факт возникновения сильных землетрясений в районах крупных водохранилищ — «плотинные землетрясения» (Койна, Индия — 9 баллов, Сан-Фернандо, США — 9 баллов и т. д.). По предположениям сейсмологов, они связаны с тем, что при накоплении деформаций в самых верхних участках земной коры наложение дополнительных нагрузок может спровоцировать землетрясение. В этом случае между увеличением нагрузки и возникновением землетрясений должна существовать корреляционная связь, которая зависит от интенсивности и направленности движений земной коры.

Количественную и качественную характеристику как вертикальных, так и горизонтальных движений земной поверхности объективно и наиболее полно могут дать геодезические измерения.

Районы строительства таких гидроэлектростанций, как Ингурская, Черкейская, Токтогульская, Саяно-Шушенская и другие, расположены в высокосейсмических зонах СССР. Детальные повторные геодезические измерения позволят выявить характер и скорости современных

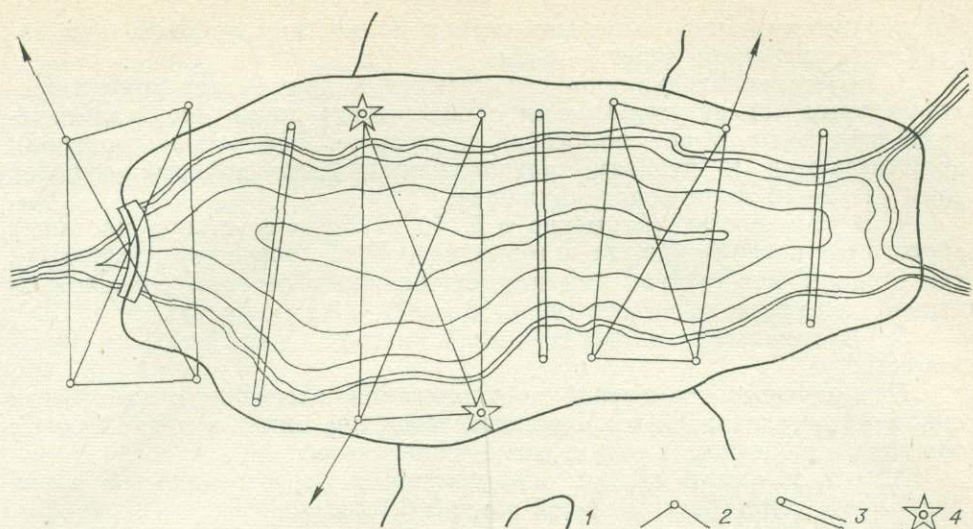


Схема геодезических построений в районе ГЭС, строящихся в сейсмоактивных зонах.
1 — линии нивелирования 1-го класса; 2 — стороны геодезических четырехугольников; 3 — линейные поперечники; 4 — пункты астрономических определений.

движений земной коры, максимальный уровень сейсмической опасности в районах строительства ГЭС, уточнить характер сейсмических процессов. Полученные данные позволят своевременно понизить уровень водохранилища и тем самым предотвратить возможные катастрофические разрушения, вызванные землетрясением.

До сих пор детальные геодезические измерения с целью изучения движений земной коры в районах строящихся ГЭС не проводились.

Междуведомственный совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Президиуме АН СССР рекомендовал Главному управлению геодезии и картографии при СМ СССР наладить геодезические измерения в районах строительства высоких плотин, в том числе Нурекской, Токтогульской, Рогунской, Ингурской, Чарвакской, Саяно-Шушенской, Зейской, т. е. в районах с возможными землетрясениями 7 баллов и более.

ЦНИИГАиК совместно с институтом Гидропроект разработал комплекс геодезических работ для изучения вертикальных и горизонтальных современных движений земной коры в этих районах.

Комплекс геодезических работ по нашему мнению, должен включать (см. рисунок):

1. Продолжение замкнутого нивелирного полигона 1-го класса по возможности по обоим берегам будущего водохранилища. При этом следует выбирать наилучшие трассы и места для закладки знаков. Необходимо учитывать и изучать районы возможных оползней. При закреплении нивелирных линий следует отдавать предпочтение скальным знакам, которые надо закладывать через 1—2 км, а в районах разломов и мест возможных оползней — чаще.

При невозможности прокладки замкнутого хода по обоим берегам прокладывается ход по одному из берегов и изолированные ходы на участках второго берега, при этом производится высотная связь берегов водохранилища путем передачи высот через водные препятствия.

2. На каждом берегу прокладываются ходы нивелирования 1-го класса в направлении, перпендикулярном к контуру водохранилища. Протяженность такого хода желательно иметь до 20—30 км в зависимости от условий местности. Трассы и места их примыкания к основ-

ному полигону также выбирают исходя из местных условий. Ход закрепляется реперами через 1—2 км.

3. Берега водохранилища связываются в двух—трех местах геодезическими четырехугольниками с измерением двумя светодальномерами всех пяти сторон по особой программе. Все четырехугольники привязываются к пунктам, расположенным вне деформирующейся зоны (в 15—20 км от водохранилища).

4. В трех местах (примерно в 5, 10 и 15 км от створа плотины) образуются поперечники, на которых по особой программе измеряются три стороны между пунктами противоположных берегов, расположенных вблизи уреза, на высоте 100—105 и 200—400 м от уреза.

5. Определяется астрономический азимут на одном из пунктов сети.

Периодичность измерений предполагается следующая: один — два цикла до наполнения водохранилища, затем два цикла в году в первые три года и один цикл в году в последующее время.

Астрономический азимут определяется в первом цикле, а затем лишь после землетрясений силой выше 5 баллов.

Такой комплекс работ рассчитан на идеальные условия. Однако расположение большинства плотин зачастую не позволяет реализовать те или иные рекомендации. В таких случаях, исходя из возможностей, предоставляемых местными условиями и наличием техники, выбираются наилучшие варианты для обеспечения наивысшей точности при оптимальных затратах средств и времени.

Предполагается, что точность геодезического обеспечения при выполнении перечисленных требований в высотном отношении будет не хуже 2—4 мм, в плановом — 3—5 мм.

А. Ш. Файтельсон, Н. Т. Миронов, М. И. Юркина

МЕДЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Вариации земного гравитационного поля и современные движения земной коры проявляются в изменениях силы тяжести, высот точек наблюдений, углов между направлениями отвесов.

Изменения силы тяжести, определяемые из повторных гравиметрических измерений, обусловлены перемещением земных масс, движениями точек наблюдения, в основном вертикальных, и изменениями центробежной силы. Несколько ниже показано, что с последними эффектами можно пока не считаться.

Изменение Δh_t высоты точки A над точкой B , выводимое из повторного геометрического нивелирования (рис. 1, точка O показывает положение нивелира, отрезки BB' , AA' , $A'A''$ — положения реек), включает два эффекта: $\Delta h_t = \Delta h_v + \Delta h_r$, где Δh_v — эффект Фоглера [19, 25], т. е. изменение разности высот на участке $l \approx A'B'$, обусловленное изменением θ направления отвеса из-за перемещения масс в недрах Земли, Δh_r — изменение высоты из-за перемещения точки A в точку A' .

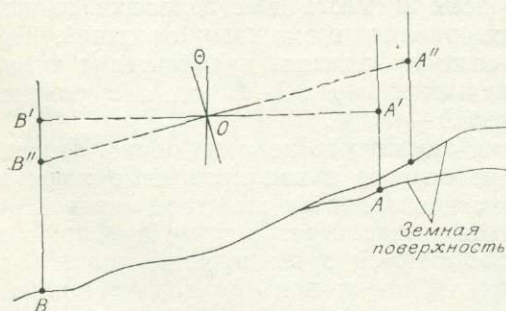


Рис. 1.

Изменение углов s между силовыми линиями может включать влияние плановых смещений. В астрономические наблюдения широты и времени входит суммарное изменение угла $s = \theta + \beta$, где $\beta = \frac{\Delta l}{R}$, R — средний

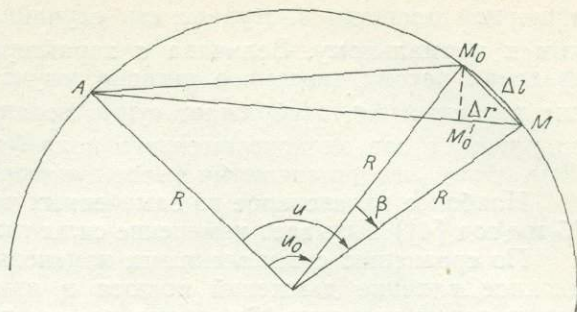


Рис. 2.

радиус Земли, Δl — плановое смещение точки M_0 (рис. 2), $\beta = U - U_0$ — изменение угла s , вызванное горизонтальным (плановым) смещением точки M_0 . Влияния θ и β можно разделить, используя новую технику при достаточно плотных повторных определениях силы тяжести. Лазерная локация Луны и ИСЗ, радиоинтерферометры с длинной базой позволяет определить изменения Δr длин хорд между точками земной поверхности, плановое смещение $\Delta l = \frac{\Delta r}{\cos \frac{\beta}{2}}$ и исключить их влияние β на изменение

углов между направлениями силовых линий.

Остановимся на некоторых полученных результатах.

Гравиметрические съемки, выполняемые Министерством геологии СССР в различных районах страны для геологоразведочных целей, послужили основой анализа изменений силы тяжести во времени. По плотной сети пунктов на обширных территориях выявлена корреляция этих изменений Δg_i с расположением геологических структур S [14—18]. Методика измерений и площадной характер исследований сводили, с одной стороны, к минимуму возможное влияние метрических помех или делали удобным их учет, с другой — позволили наиболее достоверно выявить корреляцию распределения по площади Δg_i и S . Методами математической статистики показана высокая надежность такой корреляции [23].

Средняя квадратическая ошибка проводимых в последнее время ежегодных площадных исследований составляет $\epsilon = \pm 0,01 - 0,03$ мгал. Величины расхождений за 1 год Δg_i редко превышают 0,1 мгал и обычно характеризуются величинами до 0,03 мгал. Так, мегантиклинорий Большого Кавказа характеризуется за последние годы убыванием силы

тяжести. На общем фоне заметны зоны изменения знака вариаций за один год. Величина изменения за длительный период времени (до 20 лет) меньше того, которое можно было бы ожидать из величин годовых изменений, что также свидетельствует о неравномерности изменения Δg_i и даже об изменении знака вариаций [18]. Для территории Кавказа и сопредельных областей средняя квадратическая величина $\sigma = 0,02$ мгал (рис. 3, б) при метрической ошибке в расчете на год около $\pm 0,01$ мгал. Величина Δg_i при обработке материала по

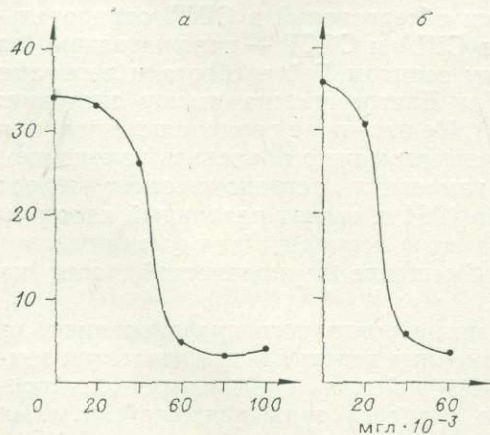


Рис. 3.

обширной площади выступает как случайная с распределением, близким к нормальному. Величина σ характеризует интенсивность Δg_i в пределах рассматриваемого региона, случайный характер распределения величины Δg_i отображает существование относительно небольших по площади зон знакопеременного поля Δg_i . Величины Δg_i не могут быть объяснены изменениями высот пунктов.

Наиболее интенсивное из замеченных теперь поднятие Кавказа (на 15 мм/год [4]) вызывает изменение силы тяжести менее чем на 5 мкгал.

По сравнению с выявленными изменениями силы тяжести гравитационное влияние движений полюса и изменений скорости вращения Земли также невелико. Смещение полюса вызывает изменение расстояний от оси вращения Земли и центробежной силы. Этот эффект может составить 10 мкгал, если смещение полюса достигает 20 м, или (как правило) несколько мкгал [24]. При увеличении длины суток на 50 мс, что превосходит влияние как кратковременных, так и систематических изменений во вращении Земли, сила тяжести на экваторе возрастает до 4 мкгал, причем влияние указанных двух факторов является региональным и не соответствует относительно дифференцированному характеру распределения по площади обнаруженных Δg_i .

Из формулы, связывающей изменение земного потенциала, в частности, со смещением центра инерции Земли, следует, что это смещение соответствует гармоникам первой степени и порядка, т. е. величинам, медленно меняющимся с перемещением по земной поверхности. Соответствующие изменения гравитационного поля не обнаружены [1,21].

Имеет место довольно дифференцированная картина интенсивных изменений астрономических широт и расхождений в результатах служб времени, используемых для изучения движения полюсов и вращения Земли. Н. Н. Павлов по расхождениям данных отдельных обсерваторий об изменении скорости вращения Земли сделал выводы о смещении некоторых блоков земной коры до 16 м [13]. По крайней мере часть расхождений можно, вероятно, объяснить изменениями гравитационного поля. Постепенно накапливаются сведения об изменении значений дуг между зенитами обсерваторий и данные об изменениях астрономических широт и долгот [7—9, 20]. Отмечено систематическое изменение длин дуг с 1964 по 1967 г. и с 1964 по 1971 г. между зенитом Юкайи и зенитами ряда обсерваторий в СССР. Эти изменения составляют за первый период от 0",021 до 0",077, во втором случае от 0",082 до 0",150, что соответствует смещениям от 3 до 5 м. Изменение длин дуг между зенитом Гейтерсберга и зенитами ряда обсерваторий в Северной Америке и СССР имеет примерно ту же величину, однако, как правило, изменение длин дуг между зенитами обсерваторий в США отрицательны, между зенитами обсерваторий в США и СССР — положительны (за 1964—1971 гг. изменения дуг между зенитом Гейтерсберга и зенитами Ричмонда, Вашингтона, Иркутска и Благовещенска имеют значения: —0",130, —0",107, +0",117, +0",041). Не исключая возможности влияния плановых смещений, указанные изменения можно объяснить изменением гравитационного поля. Графики изменения астрономических широт Юкайи и Гейтерсберга относительно 1964 г. имеют различный характер [8, 9]. Однако на обоих графиках заметна периодическая составляющая с периодом около 8 лет (рис. 4). Смещение периодической части на обоих графиках примерно 0,5 фазы.

В настоящее время имеются данные повторного нивелирования, из которых пытаются определить современные вертикальные движения земной коры. Но нивелировки не во всех районах производятся одновременно. Поэтому обычно сравнивают скорости этих движений, т. е. их величины, приходящиеся на один год $\dot{h}_i$. При этом предполагают, что движения происходят равномерно, что верно только в первом приближе-

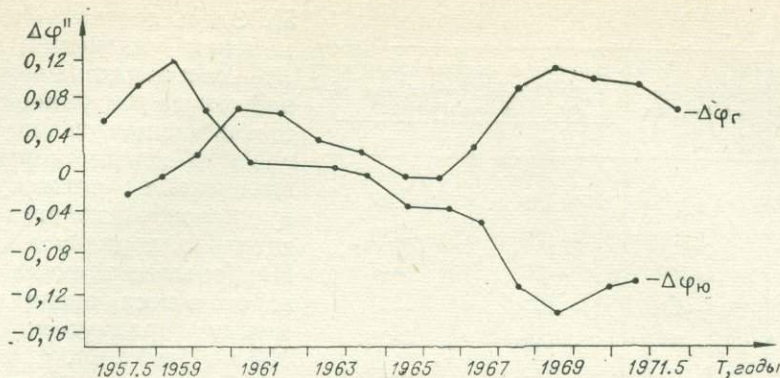


Рис. 4.

нии. Скорости движений в ряде регионов выше средних значений по геологическим данным. Это позволяет считать, что скорость движений не постоянна. Заметна корреляция h_i с геологическими структурами и геофизическими полями, что характерно и для Δg_i .

Очевидно, что как Δg_i , так и h_i связаны с глубинными процессами. Специальная обработка данных повторных нивелировок, выполненных в СССР и США, показала, что вертикальные движения содержат периодические компоненты, обусловленные достаточно простыми процессами, закономерно располагающимися в пространстве [3]. Изложенное позволяет предполагать некоторую общность процессов, обуславливающих Δg_i и h_i .

Сто лет тому назад в Мюнхене Фоглер [25] опубликовал работу, в которой был поставлен вопрос о возможном влиянии изменения наклона уровенных поверхностей на измеряемые превышения между двумя пунктами. Однако только сейчас, когда появились карты Δg_i , можно вычислить это изменение наклона θ и его влияние на результаты наблюдений. Наклоны θ являются поворотами отвесов и в то же время смещениями зенитов, взятых с обратным знаком. Влияние θ на Δh_i — эффект Фоглера Δh_v — обусловлен систематическим изменением в положении пузырька уровня у нивелиров из-за угла θ . Влияние на превышение между точками i и $i+1$ равно $\Delta h_v = \frac{1}{2} l (\theta_i + \theta_{i+1})$, где l — расстояние между точками i и $i+1$. Через h_v обозначена сумма поправок от начала счета высот.

Величины θ по картам Δg_i были вычислены по формуле Веннинг-Мейнеса с использованием палетки Еремеева, несколько измененной Орловой [12]. Величины θ вычислены для территории, охваченной площадными исследованиями Δg_i . Эффект Фоглера h_v (величины h_v , приходящиеся на год) вычислен для девяти точек профиля длиной 75 км, пересекающего характерные зоны Δg_i и h_i (h_i — вертикальные движения) на Северном Кавказе между районами Минеральных Вод на северо-востоке и Карачаевска на юго-западе (рис.



Рис. 5.

Таблица 1

Зона палетки	Радиус или область, км	Влияние на составляющие в $1 \cdot 10^{-5}$ (Сев. Кавказ, изменение за год)	
		ξ	η
1	1,8	0	0
2	8,0	-174	-30
3	14,2	-35	-7
A	16,0—23,4	-130	-31
B	23,4—34,2	-146	-38
C	34,2—50,0	-157	-32
I	50—73	-157	-37
II	73—107	-98	-20
III	107—157	-42	-14
IV	157—228	+22	+5
Σ		$-917 \cdot 10^{-5}$	$-204 \cdot 10^{-5}$

5). Здесь составляющие изменения уклонений отвеса (ξ — составляющая уклонений отвеса в меридиане, η — составляющая такого изменения в первом вертикале) выявлены по четвертую зону указанной палетки включительно, в радиусе 230 км. Наибольшее влияние на поворот отвеса оказала зона между радиусами 16—107 км (табл. 1).

Величины θ полезны также при анализе смещений зенитов обсерваторий для изучения движений полюса и неравномерности вращения Земли при повторных астрономических определениях. Были вычислены θ для обсерваторий Полтавы,

Харькова, Киева и Горького по соответствующим картам Δg_t на основе формул работы [2]. Для украинских обсерваторий вычисления выполнены по пятую зону указанной палетки в пределах радиуса 415 км, а для Горького — 170 км. Эти результаты обусловлены в основном последней из учтенных зон, и, таким образом, влияние неучтенных зон может быть существенным. При радиусе учтенной области для Горького в 2,5 раза меньшем, чем таковой для трех украинских обсерваторий, вычисленные θ в общем оказались того же порядка, что и в украинских городах. В табл. 1—3 приведены результаты вычислений ξ и η . Результаты табл. 2 и 3 использованы для выявления изменений астрономических широт и долгот. Оказывается, что вычисленные по Δg_t величины h_v и изменение астрономических широт и долгот того же порядка, что величины h_t (h'_t) и движения зенитов, обсуждаемые астрономами [7—9, 13, 20]. Так, из рис. 6 видно, что ве-

Таблица 2

Зона палетки	Радиус или область, км	Влияние на составляющие в секундах дуги (изменение за 7 лет)					
		Полтава	Харьков	Киев	Полтава	Харьков	Киев
		ξ			η		
1	2,3	0	0	0	0	0	0
2	10,0	0	0	0	0	0	0
3	17,7	0	0	0	0	0	0
A	20—29	+0"001	+0"002	0	0	+0"001	0
B	29—43	+0,002	+0,003	+0"001	0	+0,001	0
C	43—62	+0,003	+0,003	+0,001	0	+0,001	0
I	62—91	+0,004	+0,005	+0,003	0	+0,002	+0"001
II	91—134	+0,005	+0,010	+0,003	0	+0,003	+0,002
III	134—195	+0,007	+0,015	+0,005	0	+0,004	+0,002
IV	195—286	+0,013	+0,017	+0,009	+0"002	+0,004	+0,005
V	286—418	+0,013	+0,017	+0,014	+0,005	+0,005	+0,006
Σ		+0",05	+0",06	+0",04	+0",01	+0",02	+0",02

Таблица 3

Зона палетки	Радиус или область, км	Влияние на составляющие в секундах дуги (изменения за год, Горький)	
		ξ	η
1	1	0	0
2	4	0	0
3	7	0	0
A	8—12	0	0
B	12—17	0	0
C	17—25	0	0
I	25—36	0	+0,001
II	36—53	0	+0,001
III	53—78	-0,001	+0,001
IV	78—113	-0,002	+0,001
V	113—165	-0,002	+0,001
	Σ	-0",005	+0",005

личины h'_v составляют около 2,3 мм/год, т. е. примерно половину величины h' , относимой к скорости современных движений земной коры (~ 5 мм/год). Изменение астрономических широт и долгот составляет по Δg_i сотые доли секунды так же, как и наблюдаемые изменения астрономических широт и изменения длин дуг между зенитами обсерваторий (см. выше).

Возможное влияние θ на величины современных вертикальных движений и на изменение астрономических результатов, совпадение порядков влияний h_v и изменений длин дуг между зенитами обосновывает постановку обратной задачи: вычисление тех кажущихся Δg_i^* , которые смогли бы полностью объяснить наблюдаемые h_i^* , изменения астрономических широт, долгот и расхождений между службами времени.

Сделаем предположение, что h_i — только результат вековых изменений силы тяжести, т. е. $h_i \approx h_v$. Тогда можно поставить задачу изучения угла θ по данным об h_i . Такое сопоставление сделано в табл. 4, где представлены данные о шести ходах повторной нивелировки, взятые из работ [5, 6, 22]. L — длина хода, T — время между последовательными нивелировками, ΔH — изменение превышения между указанными пунктами. Углы $\theta_{cp} = \frac{\Delta H}{L}$ объясняют изменения превышений в этих ходах.

Если дополнительно сделать предположение о равновероятности возмущения силы тяжести по каждой из трех осей декартовых координат [11], то по углу θ_{cp} можно вычислить псевдовариацию Δg_i^* силы тяжести (табл. 4).

Величины θ_{cp} выражают повороты отвесов, объясняющие изменение нивелирных превышений; таким образом, Δg_i^* — соответственная горизонтальная составляющая силы тяжести. Мы в первом приближении пренебрегаем отличием величин горизонтальной составляющей и вертикальной составляющей вариаций силы тяжести. Как следует из табл. 4,

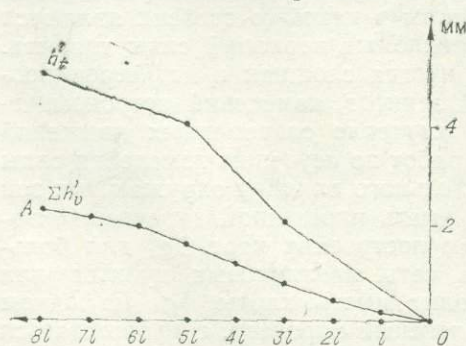


Рис. 6.

значения Δg_i^* по шести нивелирным ходам в азиатской части СССР схожи с описанными выше значениями Δg_i . Величины Δg_i^* вычислены также для 106 характерных точек на карте современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы [4]. Средняя квадратическая величина распределения Δg_i для Восточной Европы получалась равной примерно 0,03 мгал, т. е. данные по азиатской части СССР и Европе почти аналогичны.

Таблица 4

Нивелирный ход	L , км	T , лет	ΔH , м	$\theta_{\text{ср}}$	$\frac{\theta_{\text{ср}}}{T}$	$\frac{\Delta g'_{t^*}}{g \frac{\theta_{\text{ср}}}{T}}$, мгал
Красноводск — Мары	900	67	0,8	0",18	0",0027	0,013
Кандагач — Аральск	500	35	0,3	0,12	0,0034	0,016
Челябинск — Ачинск	2021	35	0,73	0,07	0,0020	0,010
Новосибирск — Семипалатинск	670	23	0,24	0,07	0,0030	0,014
Курган — Иргиз	1056	12	0,18	0,04	0,0033	0,016
Омск — Павлодар	424	20	0,23	0,11	0,0055	0,026

Обращает на себя внимание и схожий характер кривых распределения величин Δg_t для Кавказа (см. рис. 3, б) и сопредельных областей и Δg_{t^*} для Восточной Европы (см. рис. 3, а). Таким образом, при обработке материала по обширным территориям Δg_t и Δg_{t^*} выступают как случайные величины, что свидетельствует об их близком пространственном (площадном) спектре, сходном по интенсивности. Величины Δg_{t^*} вычислены как среднегодовые за большие временные интервалы. Возникает вопрос, как совпадали бы полные величины Δg_t и Δg_{t^*} за весь указанный временной интервал. Линейная интерполяция здесь вряд ли уместна, но и она дает величины Δg_{t^*} в пределах 0,5—1,0 мгал за многие десятки лет, т. е. величины, которые в Δg_t отрицать нет оснований. Таким образом, не настаивая на полном объяснении h_t вариациями силы тяжести, можно лишь поставить вопрос о том, что эти величины одного порядка, как это отмечено и выше в результате вычисления эффекта Фоглера.

Значительный интерес представляет выяснение тех Δg_{t^*} , которые могут объяснить изменения дуг между зенитами обсерваторий. Изменению дуг между зенитами Юкайи и Гейтерсберга, с одной стороны, и ряда обсерваторий в США и СССР — с другой, соответствует $\Delta g_{t^*} = -0,4 - 0,8$ мгал. Периодическая часть в изменениях широты Юкайи и Гейтерсберга в несколько сотых долей секунды может быть объяснена вариациями силы тяжести интенсивностью до нескольких долей миллигала. Общее изменение широты в Юкайе за 12 лет на 0",2 соответствует изменению силы тяжести на 1 мгал. Отклонения от среднего уровня значений астрономических широт для ряда обсерваторий соответствует нашим значениям, полученным для украинских и Горьковской обсерваторий по данным Δg_t .

Проведенный анализ показывает, что фиксируемые вертикальные и горизонтальные движения земной коры в какой-то степени являются кажущимися в связи с влиянием выявляемых вариаций силы тяжести. При этом более просто объясняется иногда сложная и дифференцированная картина движения, смещений зенитов, изменений астрономических широт и т. д. Это значит, что изучение современных движений нельзя проводить без сопутствующих работ по изучению изменения силы тяжести во времени. С учетом относительного влияния окружающих зон ясно, что исследования Δg_t должны иметь площадной характер, охватывая значительную территорию. Для построения карт Δg_t для большой территории необходимо развить сеть маятниковых пунктов или абсолютные определения. Это позволит иметь карты Δg_t на одном уровне. Работы должны носить комплексный характер, сопровождаться высокоточной нивелировкой с целью изучения современных поднятий и астрономическими наблюдениями изменений астрономических широт, долгот и положений зенитов точек наблюдений.

Уже сейчас можно говорить о существенном влиянии на результаты астрономических определений широты и времени вариаций силы тяжести и с этой точки зрения астрономические данные служат независимым доказательством существования последних. Закономерности неполярной составляющей изменения астрономических широт и смещения зенитов позволяют предполагать существование соответствующих закономерностей в вариациях силы тяжести. Это, например, относится к 7—8-летнему периоду составляющей изменения дуг между зенитами обсерваторий и изменений астрономических широт, выявленных для обсерваторий Юкайи и Гейтерсберга. Аналогичное явление замечено и в вариациях силы тяжести. Одновременные наблюдения позволяют более точно судить об этих соотношениях и поставить вопрос о привлечении астрономических наблюдений для изучения вариаций силы тяжести в том числе и в прошедшие годы.

Совместное изучение медленных изменений величины силы тяжести, полученных из гравиметрических измерений, результатов повторных нивелировок, изменений углов между силовыми линиями, определенных из астрономических наблюдений, и горизонтальных перемещений с применением современных методов и технических средств откроет, по-видимому, новые перспективы в изучении геодинамических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буланже Ю. Д., Щеглов С. Н. О вековых изменениях силы тяжести.— «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1971, № 6.
2. Еремеев В. Ф., Юркина М. И. Интегральные уравнения для плотности простого слоя.— В кн.: Интегральные уравнения Молоденского для теории фигуры Земли. Уравнения градусных измерений.— «Труды ЦНИИГАиК», 1972, вып. 198.
3. Калашникова И. В., Калачников А. А., Магницкий В. А. Некоторые закономерности современных вертикальных движений земной коры.— «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1972, № 4.
4. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. Масштаб 1 : 2 500 000. 1972.
5. Матцкова В. А. О периоде современных движений и качественной характеристике кривой скорости движений.— В кн.:— Современные движения земной коры. Вып. 2. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1965.
6. Мешерский И. Н. Многократные повторные нивелирования по трассе Краснодарск — Чарджоу.— В кн.: Современные движения земной коры. М., «Наука», 1968, № 4.
7. Миронов Н. Т. О природе медленных изменений широты.— В кн.: Астрономический циркуляр. АН СССР, Бюро астрономических сообщений, 1973, № 769.
8. Миронов Н. Т. О (не) полярных изменениях средних широт Юкайи и Гейтерсберга.— В кн.: Астрономический циркуляр. АН СССР, Бюро астрономических сообщений, 1973, № 711.
9. Миронов Н. Т., Корсунь А. А. On the relative displacements of the zeniths of astronomical observatories. 2nd International Symposium Geodesy and Physics of the Earth. Potsdam. May 7—11, 1973. Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde, 1974, № 30, Teil 1.
10. Молоденский М. С. Современные задачи изучения фигуры Земли.— «Геодезия и картография», 1958, № 7.
11. Молоденский М. С., Еремеев В. Ф., Юркина М. И. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли. (Труды ЦНИИГАиК вып. 131). М., Изд-во геодезической литературы, 1960.
12. Орлова Е. М. Таблицы для учета нелинейности влияния высот топографического массива на уклонения отвеса.— «Труды ЦНИИГАиК», 1965, вып. 157.
13. Павлов Н. Н. Возможные перемещения материковых блоков.— «Астрономический журнал», 1970, № 47, вып. 4.
14. Файтельсон А. Ш. Вековые изменения силы тяжести на Русской платформе.— «Докл. АН СССР», 1969, 188, № 3.
15. Файтельсон А. Ш. Вековые изменения силы тяжести в Арало-Каспийской области.— «Докл. АН СССР», 1969, т. 189, № 6.
16. Файтельсон А. Ш., Азаркина Е. А. Вековые изменения силы тяжести на Украине.— «Докл. АН СССР», 1970, т. 195, № 1.
17. Файтельсон А. Ш., Азаркина Е. А. Вековые изменения силы тяжести на Кавказе.— «Изв. АН СССР». Физика Земли, 1972, № 9.
18. Файтельсон А. Ш., Азаркина Е. А., Краснов Б. А., Курашова В. В., Филиппович Н. Г. О выявлении вековых изменений силы тяжести.— В кн.: Прикладная геофизика, 1971, вып. 64.

19. Файтельсон А. Ш., Юркина М. И. Влияние вековых изменений силы тяжести на результаты повторного нивелирования. — «Докл. АН СССР», 1973, № 6.
20. Федоров Е. П., Корсунь А. А., Майор С. П., Панченко Н. И., Тарадий В. К., Яцкив Я. С. Движение полюса Земли с 1890.0 по 1969.0 Киев, «Наукова думка», 1972.
21. Федьинский В. В. Разведочная геофизика. М., «Недра», 1965.
22. Фиалков Д. Н. Достоверность вертикальных движений земной коры Западной Сибири. — В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 2. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1965.
23. Шрайбман В. И., Файтельсон А. Ш. Количественные оценки связей вариаций гравитационного поля с геоструктурными элементами земной коры (автореферат доклада, прочитанного 20.IV 1971). Бюллетень Московского общества испытателей природы, 1971, т. 76, отделение геологии, т. 46, вып. 5.
24. Bursa Milan. Variations of the Earth's gravity field due to the free nutation. *Studia geophysica et geodaetica*, 1972, 16, № 2.
25. Volger Chr. August. Über Ziele und Hilfsmittel geometrischer Präcisions-Nivellements. München. Literarisch-artistische Austalt (Th. Riedel) vormals der Cotta'schen Buchhandlung. 1873.

А. Т. Донабедов, В. А. Сидоров, В. А. Филькин

СОВРЕМЕННЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ОБЛАСТЯХ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ГРОЗНЕНСКОМ И РЕЧИЦКОМ ПОЛИГОНАХ)

Разработка проблемы современных движений земной коры вступает в новую стадию. Если 60-е гг. характеризовались интенсивным накоплением данных о современных деформациях земной поверхности, изучением пространственных закономерностей этих движений, то в последние годы существенное развитие получили исследования, связанные с попытками объяснения полученных данных и их использования в научных и практических целях. Современная методика и техника повторных инструментальных измерений позволяют получить с надлежащей точностью количественную характеристику движений.

В настоящее время наиболее четко оформилось два крупных направления в проблеме современных движений земной коры, связанных с использованием полученных результатов для практики: а) изучение современных деформаций земной поверхности в сейсмоактивных областях и попытка использования полученных данных как предвестников при прогнозе землетрясений; б) изучение современных деформаций земной поверхности для использования полученных данных при поисково-разведочных работах на различные полезные ископаемые (нефть, газ, уголь и т. д.). Основное содержание последнего направления (применительно к нефтяной геологии) было сформулировано авторами в 1959 г. в Комплексной южной геологической экспедиции АН СССР, а с 1960 г. разрабатывается в Институте геологии и разработки горючих ископаемых Министерства нефтяной промышленности и АН СССР в связи с решением проблемы выявления закономерностей размещения и формирования месторождений нефти и газа.

Нефтедобывающая промышленность СССР характеризуется высокими темпами развития. Увеличивающийся уровень добычи нефти и газа требует существенного увеличения научно-исследовательских и геологоразведочных работ и повышения их экономической эффективности. В настоящее время во многих нефтедобывающих районах поиск и разведка нефтяных и газовых месторождений ведутся на глубине 4 км и более. В большинстве случаев осадочная толща такой мощности характе-

ризуется весьма сложным строением. Поэтому только объективное знание геолого-геофизических характеристик структурных элементов различного типа и порядка (в том числе пограничных зон), закономерных связей между особенностями строения осадочной толщи и глубинных зон нефтегазоносных областей, строения и условий залегания месторождений нефти и газа на больших глубинах может привести к правильному выбору основных направлений поисково-разведочных работ. Применяемый в настоящее время комплекс геофизических исследований не всегда и не везде позволяет в достаточной мере осветить особенности геологического строения глубоких и сложнопостроенных частей нефтегазоносных областей. В этой связи важное значение приобретает как усовершенствование применяемых, так и разработка новых методов, позволяющих выявить существенные особенности в тектоническом строении нефтегазоносных областей, а также новые поисковые признаки. К числу таких методов относятся повторные геодезические и геофизические измерения, позволяющие выявлять современные деформации земной поверхности (медленные движения и сейсмичность).

Систематическое изучение современных деформаций земной поверхности (в соотношении с геофизическими полями) для выявления особенностей строения структурных элементов нефтегазоносных областей и закономерностей размещения и формирования нефтегазоносных месторождений, судя по литературным данным, ни в СССР, ни за рубежом не проводилось.

Научные предпосылки для развития этого направления состоят в следующем: а) величина и знак современных деформаций земной поверхности закономерно обусловлены как современными физико-химическими процессами в глубинных зонах земной коры и верхней мантии, так и особенностями пространственного распределения геоструктурных элементов и пограничных зон между ними, которые формировались на протяжении всей геологической истории и закономерно отражаются в геофизических полях; б) поскольку распределение локальных структур в осадочной толще и региональных зон выклинивания и стратиграфического несогласия осадочных пород контролируется региональными блоками, пограничными зонами между ними и внутриблоковыми границами, закономерно отражающимися в современных деформациях земной поверхности, последние можно использовать и при изучении закономерностей размещения и формирования месторождений нефти и газа.

Исходя из поставленной задачи и результатов регионального обобщения данных о современных движениях земной коры в нефтегазоносных областях, ИГиРГИ МНП и АН СССР с 1972 г. приступил к осуществлению программы научно-исследовательских и опытно-методических работ в пределах Припятской впадины (Речицкий полигон) и Терско-Каспийского краевого прогиба (Грозненский полигон). Выбор объектов исследований основывался на особенностях геологического строения и задачах поисково-разведочных работ на нефть и газ.

При проведении опытно-методических работ в этих нефтегазоносных областях преследовались следующие цели: а) разработка комплексной методики выявления пространственных и временных характеристик современных движений земной поверхности в нефтегазоносных и сопредельных областях; б) изучение закономерностей проявления современных движений земной поверхности в связи с особенностями неоднородного строения земной коры нефтегазоносных областей и геолого-структурными условиями размещения месторождений нефти и газа; в) использование полученных закономерностей при поисково-разведочных работах на нефть и газ в качестве нового дополнительного признака (метода) в общем комплексе геолого-геофизических методов.

Конкретные задачи исследований на Речицком полигоне в пределах Припятской впадины сводились к следующему: а) количественной оцен-

ке современных вертикальных движений земной поверхности северо-востока Припятской впадины — звена крупнейшего внутриплатформенного геоструктурного элемента — днепровско-донецкого авлакогена; б) выявлению характера современных вертикальных движений (по отдельным профилям) для совокупности известных месторождений нефти — Речицкого, Осташковичского, Тишковского, Золотухинского, Восточно-Первомайского, а также для совокупности локальных структур с невыявленной нефтегазоносностью — Малодушинской, Омельковщинской; в) определению характера современных вертикальных движений земной поверхности в пограничных зонах между блоками различного порядка, намеченных по данным сейсморазведки и бурения (Речицкого разлома, контролирующего Речицко-Вишанскую зону месторождений нефти, Малодушинского разлома и др.); г) выявлению современных движений земной поверхности по простиранию основных структурных элементов Припятской впадины для изучения характера сочленения локальных структур.

На Грозненском полигоне в пределах Терско-Каспийского прогиба следовало определить:

а) современные вертикальные движения земной поверхности центральной части краевого прогиба — одного из основных типов геоструктурных элементов земной коры; б) характер современных вертикальных движений земной поверхности основных структурных элементов прогиба — Терской и Сунженской антиклинальных зон, Алханчуртской синклинальной зоны; в) характер современных вертикальных движений земной поверхности отдельных складок (месторождений нефти) — Малгобек-Вознесенской, Карабулак-Ачалукской, Хаянкортовской, Старогрозненской и др.; г) характер современных вертикальных движений земной поверхности пограничных зон (разломов, флексур) между основными структурными элементами прогиба, а также между отдельными складками.

В качестве первоочередных объектов были намечены структурные элементы (нефтяные месторождения, «пустые» структуры, зоны разломов), которые относительно лучше изучены геолого-геофизическими методами. В ходе систематических наблюдений на этих различных структурных элементах предполагалось выработать «эталоны», характеризующие закономерности пространственно-временного изменения современных вертикальных движений земной поверхности.

Целенаправленно была выбрана система линий повторного нивелирования для северо-востока Припятской впадины (рис. 1) и для центральной части Терско-Каспийского прогиба (рис. 2).

В пределах Припятской впадины протяженность линий повторного нивелирования составила около 200 км. Вдоль них было заложено 160 грунтовых реперов. За период 1972—1974 гг. произведено от 5 до 7 нивелирований 1-го и 2-го классов «повышенной точности» с интервалами между повторениями от 4 до 16 месяцев для различных структур. Средняя квадратическая случайная ошибка нивелирования, вычисленная по разностям превышений в прямом и обратном ходах, составляет $(\pm 0,4) - (\pm 0,6)$ мм/км. Вычислялись не скорости смещений за единицу времени, а величины смещений за тот или иной исследуемый интервал времени. Средняя квадратическая ошибка определения этих величин смещений для различных интервалов времени между нивелировками составила $(\pm 0,6) - (\pm 0,8)$ мм/км.

В пределах Терско-Каспийского прогиба протяженность линий повторного нивелирования составила 608 км. Вдоль них заложено 312 грунтовых реперов. Произведено два нивелирования 2-го класса, которые выполнило Предприятие ГУГКа СМ СССР. На одном из «эталонных» профилей силами ИГиРГИ выполнено три нивелирования 2-го класса.

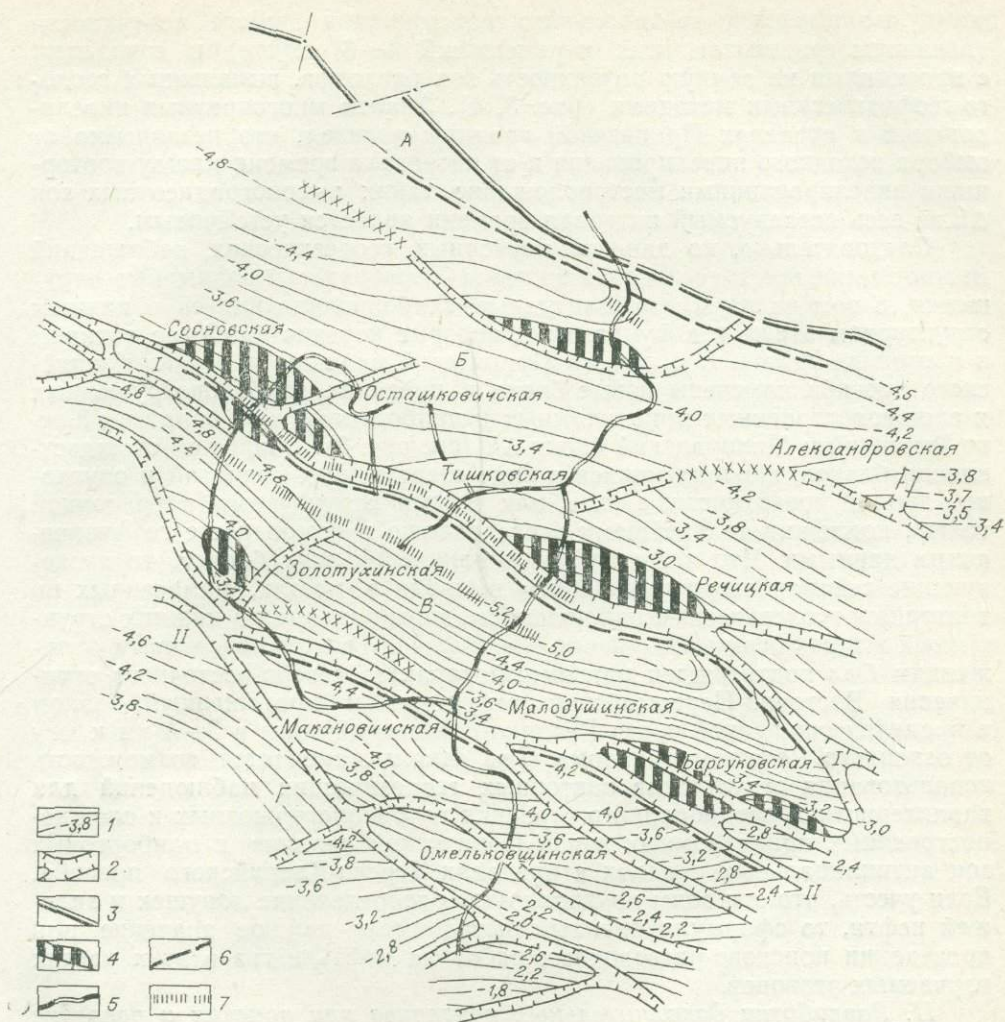


Рис. 1. Структурная схема по поверхности подсолевых отложений девона северо-востока Припятской впадины и расположение линий повторного нивелирования (Речицкий полигон).

1 — изогипсы поверхности подсолевых отложений девона; 2 — разломы по геофизическим данным; 3 — краевой разлом Припятской впадины; 4 — месторождения нефти; 5 — линии повторного нивелирования; 6 — границы структурно-тектонических зон Припятской впадины (структурно-тектонические зоны: А — Северная прибортовая, Б — Речицко-Шатилковская, В — Малоушинская, Г — Центральная); 7 — пограничные зоны (вероятные зоны разрывных нарушений) между блоками земной коры, выявленные по данным повторного нивелирования.

Результаты измерений на Речицком и Грозненском полигонах представлены в виде кривых смещений земной поверхности за различные промежутки времени — Δh и в виде горизонтальных градиентов этих смещений на 1 км — $\text{grad } \Delta h$ (мм/км). Полученные к настоящему времени данные позволяют наметить следующие основные направления в их использовании.

1. Решение структурно-тектонических задач в нефтегазоносных областях. Установлена возможность выделения участков относительных современных поднятий и опусканий земной поверхности, которые отражают местоположение и современное вертикальное перемещение блоков различного порядка в верхних частях земной коры. Пограничные зоны между этими блоками шириной 0,5—1,5 км характеризуются наиболь-

шими амплитудами вертикального перемещения земной поверхности (величины градиентов этих перемещений 4—6 мм/км) и совпадают с проекциями на земную поверхность зон разломов, выявленных геолого-геофизическими методами (рис. 3, 4). Анализ многократных нивелирований в пределах Припятской впадины показал, что независимо от выбора исходного нивелирования и от интервала времени между повторными нивелированиями местоположение таких высокоградиентных зон Δh за весь исследуемый интервал времени является устойчивым.

Следовательно, по данным повторных геодезических наблюдений можно выявить и трассировать на земной поверхности разрывные нарушения, в том числе малоамплитудные, слабопроявляющиеся в нижнем структурном этаже и в фундаменте, которые нередко наиболее активны в настоящее время. В пределах Припятской впадины и Терско-Каспийского прогиба намечены новые блоки в пределах глубокопогруженных и сложнопостроенных приразломных и прибортовых зон, например Южно-Речицкий и Милорадский блоки Δh (см. рис. 3). Вопрос об отождествлении блоков, проявляющихся в виде современных поднятий и опусканий земной поверхности, с теми или иными структурами в осадочной толще, подлежит дальнейшему исследованию в комплексе с геофизическими данными. Что касается зон ограничения этих блоков, то последующие сейсморазведочные работы выявили в местах, намеченных по повторным геодезическим наблюдениям, зоны разломов в нижних структурных этажах осадочной толщи (см. рис. 1). Так, по подсольевым отложениям был подтвержден разломный характер северо-восточного ограничения Восточно-Первомайской структуры и протяженный разлом в пределах опущенной части Речицко-Вишанской зоны в 3—4 км к югу от основного Речицкого разлома. Тем самым намечается возможность использования результатов повторных геодезических наблюдений для характеристики неоднородного строения глубокопогруженных и сложнопостроенных приразломных зон в Припятской впадине и прибортовых зон антиклинальных складок в пределах Терско-Каспийского прогиба. Если учесть, что эти зоны контролируют распределение ловушек и залежей нефти, то сформулированный вывод имеет важное значение при проведении поисково-разведочных работ на нефть и газ в этих частях изучаемых регионов.

II. Разработка дополнительных критериев при поисках и разведке месторождений нефти и газа. Выявленная ранее приуроченность нефтяных и газовых месторождений к активным в настоящее время региональным пограничным зонам между блоками земной коры [1, 2] подтверждена результатами полевых работ в Речицко-Вишанской зоне поднятий (см. рис. 1). С наиболее контрастной Малгобек-Грозненской магистральной зоной Δh в пределах Терско-Каспийского прогиба (см. рис. 2, 4) совпадают и наиболее крупные месторождения нефти — Малгобек-Вознесенское и Старогрозненское. Единичные месторождения (Речицкое, Осташковичское, Восточно-Первомайское, Золотухинское в Припятской впадине и Хаянкортовское в Терско-Каспийском прогибе) ограничены зонами высоких градиентов современных вертикальных движений земной поверхности или находятся в «узлах» пересечения таких зон.

Данные, полученные для таких структур, как Малодушинская и Омельковщинская в Припятской впадине, где до настоящего времени нет промышленных притоков нефти, свидетельствуют о значительно меньшей амплитуде вертикальных смещений земной поверхности, во всяком случае по разломам в фундаменте и в нижнем структурном этаже (см. рис. 3). Задача дальнейших исследований — выявить устойчивость изменения современных движений и их отличительные признаки для месторождений нефти и «пустых» структур. Только после этого, на основе выработанных «эталонов» для каждой из нефтегазоносных областей, данные по повторному нивелированию будут использованы

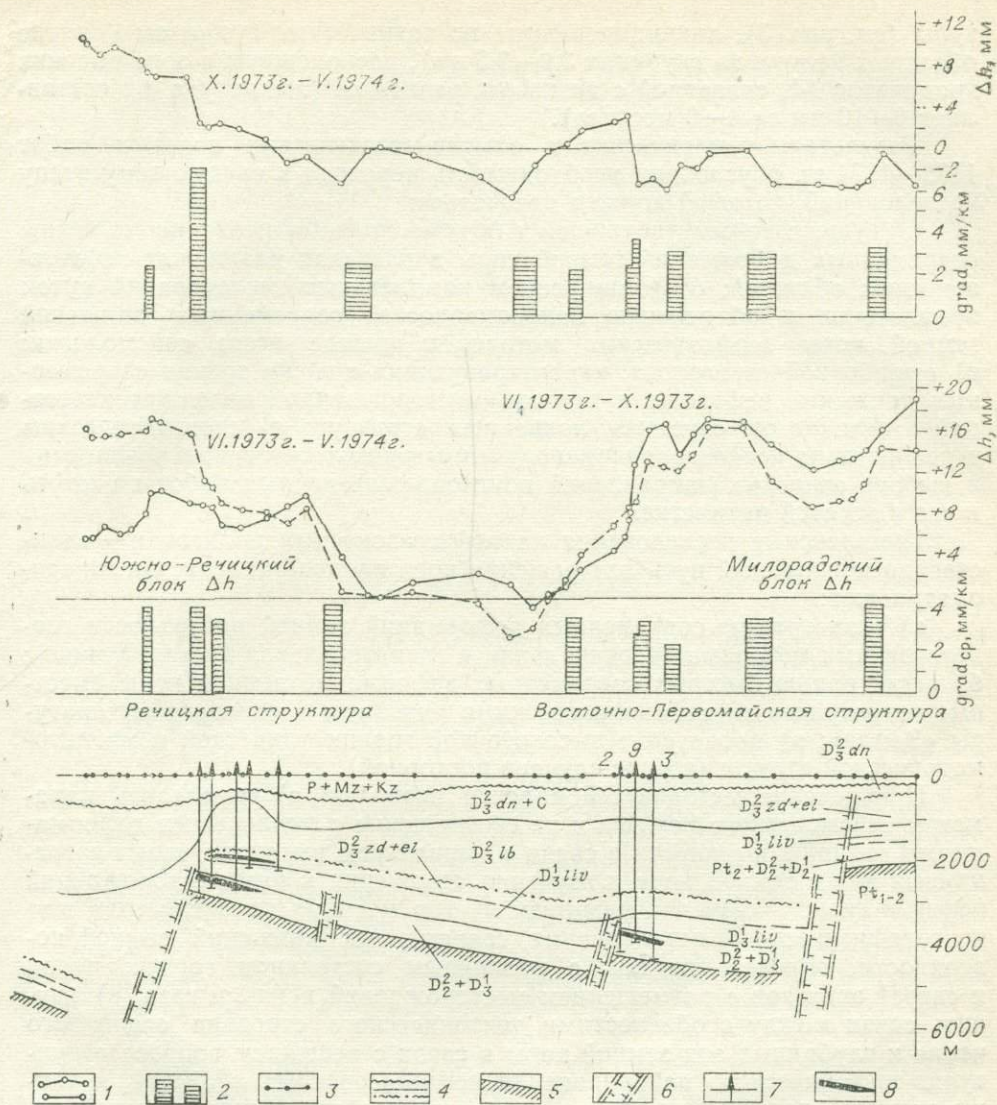


Рис. 3. Характер современных вертикальных движений земной поверхности по профилю структур: Речицкая — Восточно-Первомайская (Речицкий полигон).

1 — кривые современных вертикальных движений земной поверхности за различные промежутки времени между нивелировками (Δh , мм); 2 — абсолютные величины горизонтальных градиентов современных вертикальных движений земной поверхности; мм/км — более тройной среднеквадратической ошибки величин Δh ; 3 — местоположение нивелирных реперов; 4 — геологические границы по геолого-геофизическим данным; 5 — поверхность кристаллического фундамента; 6 — разрывные нарушения по геофизическим данным; 7 — скважины; 8 — месторождения нефти.

в комплексе с другими методами для поисков новых месторождений нефти.

III. Проводка глубоких скважин в районах со сложными геологическими условиями. Высокая аварийность скважин, особенно в пределах Терско-Сунженской нефтегазоносной области, может быть связана не только с нарушениями технологии бурения, но и с геолого-структурными особенностями, проявляющимися в пространственно-временном изменении режима современных деформаций верхних частей земной коры. Так, например, скважины в южной части Восточно-Первомайской струк-

туры (см. рис. 3), ликвидированные по техническим причинам (снятие обсадных колонн на глубинах 3,0—3,5 км), расположены в зоне высоких градиентов Δh , связанной с активным разломом (амплитуда Δh составляет 6—10 мм за 4—6 месяцев).

Результаты тематических и опытно-методических полевых работ 1972—1974 гг. обусловили необходимость перехода к следующему этапу исследований, который должен отличаться:

а) существенным увеличением объема полевых работ по изучению современных деформаций земной коры в пределах различных нефтегазоносных областей; б) расширением комплексных исследований путем привлечения к объяснению закономерностей современных движений земной коры геофизических методов и прежде всего сейсмологии; в) выработкой «эталонов», характеризующих с точки зрения современных движений нефтяные и газовые месторождения различных категорий в отличие от «пустых» локальных структур; г) систематическим и ускоренным использованием полученных результатов при разработке и выборе основных направлений поисково-разведочных работ на нефть и газ в десятой пятилетке.

Комплексные исследования на нефтегазоносных полигонах — единственно правильный путь для решения поставленной задачи. Они предусматривают:

а) регистрацию современных деформаций земной поверхности геодезическими методами (вертикальная и горизонтальная составляющие); б) регистрацию быстрых современных деформаций земной коры (местные землетрясения) сейсмологическими методами с помощью аппаратуры «Земля»; в) проведение высокоточной гравиметрической и магнитометрической съемок (в ряде случаев повторной).

Привлечение методов сейсмологии позволит: а) определить параметры сейсмического режима и их соотношение с медленными деформациями земной поверхности в связи с выявлением высокоактивных пограничных зон в земной коре и изучения отношения к ним месторождений нефти и газа; б) изучить механизм очагов местных землетрясений для тектонофизического истолкования современных движений земной поверхности, определения зон с различным состоянием горных пород и связей этих зон с размещением месторождений нефти и газа; в) изучить связи между особенностями тектонического строения осадочного чехла и глубинных зон земной коры в связи с решением вопроса структурно-тектонического районирования нефтегазоносных областей, а также изучить соотношения между современными движениями земной поверхности и неоднородным строением земной коры нефтегазоносных областей.

Гравиметрические и магнитометрические работы необходимы для истолкования современных движений земной поверхности и выработки комплекса признаков, характеризующих структуры различного порядка (в том числе и месторождений нефти).

ЛИТЕРАТУРА

1. Донабедов А. Т., Сидоров В. А. Способ прогнозирования зон нефтегазонакопления. Авторское свидетельство № 221 955. — «Бюллетень открытий, изобретений и товарных знаков», 1968, № 22.
2. Донабедов А. Т., Сидоров В. А. Некоторые данные о соотношениях между современными вертикальными движениями земной коры и геофизическими полями в пределах Волго-Уральской нефтеносной провинции и УССР. — «Проблемы геологии нефти», 1972, № 2.

О ТОЧНОСТИ НИВЕЛИРОВАНИЯ 1-ГО КЛАССА
В ГОРНЫХ РАЙОНАХ

В статье И. Н. Мещерского и И. И. Энтина¹ теоретически и практически было показано, что на точность нивелирования 1-го и 2-го классов в горах значительное влияние оказывают ошибки, вызванные инварными рейками. Влияние этих ошибок можно оценить по формуле

$$m_p^2 = (1050n + 170h^2) \text{ мк}^2, \quad (1)$$

где m_p — ошибка нивелирования, вызванная инварными рейками, n — число станций в ходе, h — превышение в м.

Приведем для иллюстрации некоторые численные величины m_p для линий разного протяжения L и с разными превышениями h :

L , км	h , м (уклон)	m_p , мм	$3m_p$, мм
5	100(0,02)	$\pm 1,3$	$\pm 3,9$
5	200(0,04)	$\pm 2,6$	$\pm 7,8$
10	400(0,04)	$\pm 5,2$	$\pm 15,6$
50	1000(0,04)	$\pm 13,0$	$\pm 39,0$

Видно, что в районах с большими уклонами ошибка m_p , вызванная инварными рейками, становится ощутимой. При этом основной является та часть ошибки, которая растет пропорционально превышению.

Выполненные в предприятиях ГУГК в 1972—1974 гг. опытные работы по нивелированию 1-го класса в горах подтвердили, что эта ошибка может существенно снизить точность нивелирования.

На территории Киргизской ССР 18—29 июля 1972 г. одновременно двумя бригадами было выполнено нивелирование линии по программе 1-го класса длиной 25,1 км, закрепленной 11 грунтовыми реперами. Пять секций нивелирного хода находились вблизи перевала через горный хребет. Превышения на этих секциях колебались от 120 до 200 м, число станций на 1 км хода доходило до 40. На остальных секциях превышения были значительно меньше, не более 36 м. Нивелирование выполняли при помощи нивелиров $Ni\ 004$ и инварных реек.

В сентябре 1972 г. линию нивелировали третий раз.

Средние значения случайных и систематических ошибок, найденных по формулам Лаллемана по разностям $d_5 = (h_{\text{прав}} - h_{\text{лев}})_{\text{ср}}$ и $d_6 = (h_{\text{прямое}} - h_{\text{обратное}})_{\text{ср}}$, оказались равными (мм/км); $\eta_5 = \pm 0,38$; $\eta_6 = \pm 0,79$; $\sigma_5 = \pm 0,03$ и $\sigma_6 = \pm 0,14$ мм/км.

Ниже приведены расхождения Δ_1 между абсолютными значениями превышений, полученными в июле разными исполнителями, и расхождения Δ_2 между превышениями, полученными одним и тем же исполнителем, но в разное время года.

№ секции	L , км	h , м	Δ_1 , мм	Δ_2 , мм
1	3,9	+143,7	-6,5	+0,6
2	2,8	+206,4	-7,3	+0,7
3	2,2	+138,9	-4,7	+1,1
4	1,9	-121,1	+5,4	-0,4
5	2,2	-139,0	-6,4	+1,4
6	2,5	-26,0	-2,8	-0,6
7	2,3	-27,4	-3,5	+0,7
8	3,2	-22,3	-5,5	+2,5
9	2,0	-31,8	+1,7	+0,3
10	2,1	-36,3	0,0	+2,2
Σ	25,1		-29,0	+8,5

¹ Мещерский И. Н., Энтин И. И. Ошибки нивелирования, вызванные применением инварных реек. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1962, вып. 147.

Как видно из приведенных данных, разности Δ_1 значительны по величине. В среднем различие достигает $-0,03$ мм на 1 м превышения. Расхождения Δ_2 меньше, хотя нивелирование выполняли при разных погодных условиях.

Значения средней квадратической ошибки на 1 км двойного нивелирного хода, вычисленные по формуле

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{2Ln}} \quad (2)$$

(n — число разностей Δ , L — расстояние между смежными знаками, км), оказались для гор равными $\pm 2,1$ мм/км, для предгорий — $\pm 1,2$ мм/км. Следует отметить, что значения превышений между начальными и конечными реперами, полученные разными исполнителями и в разное время года, различаются незначительно: $+85,1837$; $+85,1898$ и $+85,1932$ м.

В 1972—1973 гг. было выполнено четыре нивелирования одной линии длиной 19,0 км. Линия была закреплена девятью грунтовыми реперами. Трасса пересекала Вахский хребет. Сумма превышений по северному склону хребта равна $+543$ м (четыре секции), по южному — 590 м (четыре секции). Первый раз нивелирование выполняли одновременно две бригады в ноябре — декабре 1972 г. при средней температуре воздуха от $+1$ до $+16^\circ\text{C}$, второй раз линия нивелировалась летом 1973 г. при температуре воздуха от $+21$ до $+35^\circ\text{C}$ теми же бригадами. Нивелирование производили нивелирами $Ni004$ и инварными рейками. При нивелировании каждая бригада использовала свой комплект инварных реек, в прямом ходе один, в обратном — другой.

В измеренные превышения были введены поправки δ_i и σ_i .

$$\delta_i = \alpha(t_n - t_0)h, \quad (3)$$

где α — коэффициент линейного расширения инварных реек, который был принят 2×10^{-6} , t_0 и t_n — температура реек при эталонировании и средняя температура воздуха при нивелировании. Поправка δ_i вычислена по результатам эталонирования реек на компараторе по формуле

$$\delta_i = hl_0, \quad (4)$$

где l_0 — средняя длина метра комплекта инварных реек, полученная при эталонировании.

В случае передачи высот через горный перевал при помощи одних и тех же инварных реек и нивелиров результаты получаются довольно хорошие: $-47,0851$; $-47,0890$; $-47,0946$ и $-47,0932$ м. Максимальное различие равно 9,5 мм. Сумма же абсолютных измеренных превышений, полученных в 1972 г., отличается от превышений 1973 г. на 66 мм. После введения поправок δ_i и σ_i сходимость результатов улучшилась, расхождение уменьшилось до 24 мм.

В 1970 г. сотрудники ЦНИИГАиК выполнили десять раз нивелирование полигона периметром 9 км. Четыре хода были проложены нивелиром Н2, четыре хода нивелиром $NiA-3$ фирмы МОМ и один нивелиром $Ni004$. Нивелирование выполняли по программе 1-го класса разные исполнители весной, летом и осенью. На четырех секциях превышения были менее 4,5 м, на трех — 15,5; $-29,5$ и $+37,8$ м. Длины секций 1,0—1,5 км. Случайные ошибки, найденные по (5), оказались для первых четырех секций $\pm 0,56$ мм/км, а для трех других — $\pm 0,85$ мм/км.

$$m = \pm \sqrt{\frac{\Sigma \delta^2}{2L(n-1)}}, \quad (5)$$

где $\delta = h_{cp} - h_i$, n — число превышений, L — длина секции в км, h_i — измеренное превышение.

Подобные данные были получены в 1971—1972 гг. при нивелировании полигона периметром 9 км сотрудниками Института физики Земли в районе г. Гарм Таджикской ССР и на Алма-Атинском полигоне.

На основе приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. Ошибка превышения является функцией от его величины и расстояния между смежными знаками. Чем больше превышение, тем грубее оно определяется. Ожидаемая ошибка нивелирования вычисляется по формуле

$$m_{\text{ожид}}^2 = \eta^2 L + \sigma^2 h^2, \quad (6)$$

где η — случайная средняя квадратическая ошибка на 1 км двойного нивелирного хода, L — длина хода в км, σ — систематическая ошибка на 1 м превышения в мм, h — превышение в м.

2. Передачу высот через перевал, т. е. подъем и спуск примерно к той же высоте, должна выполнять одна и та же нивелирная бригада одним и тем же нивелиром и комплектом инварных реек. В этом случае отметки точек, находящихся в разных долинах, будут определяться достаточно точно. На перевальных участках ошибки нивелирования будут больше.

3. При камеральной обработке результатов нивелирования следует вводить поправки δ_l и δ_t по формуле

$$\sum \delta = h \Delta l_0 + h \alpha_{\text{ср}} (t'_n - t_a) - \sum \Pi \alpha_{\text{ср}} \Delta t, \quad (7)$$

где h — измеренное превышение в м, Δl_0 — отличие средней длины метра комплекта инварных реек от номинала, полученное в результате эталонирования реек на компараторе, $\alpha_{\text{ср}}$ — коэффициент линейного расширения комплекта инварных реек, t_a — температура реек при эталонировании, t'_n — среднее значение температуры воздуха при нивелировании, если температуру измеряли термометром-пращем, или температура инварной полосы задней рейки, если рейки снабжены термодатчиками, $\sum \Pi$ — сумма отсчетов по основной шкале передней рейки в м, $\Delta t = t'_n - t''$, t'' — среднее значение температуры передней рейки, полученное при помощи термодатчика.

Первый член в формуле (7) является поправкой δ_l за среднюю длину метра комплекта реек. Чем больше отличаются длины отдельных метровых интервалов от номинала и от среднего значения, тем грубее будет определяться эта поправка. Второй член вызван различием температуры рейки в момент нивелирования и при эталонировании на компараторе. Чем больше различие этих температур, чем больше коэффициент линейного расширения реек и чем грубее измерена температура, тем грубее определяется поправка. У реек, предназначенных для работы в горах, следует определять коэффициенты линейного расширения, и они, как правило, должны быть менее 0,001 мм/м на 1°C.

Третий член в формуле (7) обусловлен различием температур задней и передней реек во время взятия отсчетов. Это различие может достигать 5°C и более. Температура освещенной солнцем инварной полосы рейки выше, чем у полосы, находящейся в тени.

Для более точного определения двух последних поправок при нивелировании в горах следует применять инварные рейки с термодатчиками для измерения температуры инварных лент в полевых условиях.

С. В. Энман

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРЕЦИЗИОННОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ

Для получения достоверных величин вертикальных смещений земной коры при частых повторных измерениях на полигонах по изучению современных движений земной коры в горных районах необходимо повышение точности прецизионного нивелирования.

При соблюдении требований инструкции по нивелированию 1-го класса в отношении выбора приборов, методов и обработки результатов нивелирования мы получаем на геодинимических полигонах среднюю квадратическую ошибку километра хода по внутренней сходимости (по разностям превышений прямых и обратных ходов) $m = \pm 0,3 - 0,5$ мм. Эта ошибка достаточно надежно характеризовала бы действительную точность нивелирования, если бы разности превышений прямого и обратного ходов были свободны от систематических ошибок нивелирования. Опыт работ в горах показывает, что при ослаблении систематических ошибок перемещения костылей и штатива (постоянное или заблаговременное закрепление переходных точек) и тепловых деформаций нивелира (затенение прибора во время работы и транспортировки) высокоточное нивелирование отягощено еще несколькими крупными источниками систематического влияния.

ОШИБКА ИЗ-ЗА НЕПРАВИЛЬНОГО УЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ НИВЕЛИРОВАНИЯ

Работами исследователей [3, 4, 6, 8, 9] установлено, что введение температурной поправки по температуре воздуха, а не реек вносит в результаты измерений систематическую ошибку.

В результате наблюдений, начатых в ИФЗ АН СССР в 1968 г. на полигонах Средней Азии, выявлено, что систематический характер этой ошибки вызван тем, что в солнечную погоду и частично в облачную температура инварных полос реек выше температуры воздуха, а температуры передних и задних реек различны.

Неправильный учет температуры нивелирования вносит в результаты нивелирования на полигонах Средней Азии (Гарм, Руноу, Талгар) систематическую ошибку, в среднем равную $\sigma_i = \pm 0,3$ мм/км. Введение температурной поправки в результаты нивелирования с учетом температур задних и передних реек улучшает расхождение превышений прямых и обратных ходов и уменьшает среднюю квадратическую километровую ошибку в среднем на 10%. Результаты работ 1973 г. показали, что разница температуры инварной полосы рейки и деревянного корпуса в среднем равна $\pm 2^\circ\text{C}$ (максимально $5-6^\circ\text{C}$). Такая разница не вызовет ее коробления и как следствие этого изменения длины метра рейки. Последними работами в Средней Азии установлено, что наибольшие ошибки из-за неправильного учета температуры реек при нивелировании

возникают при относительно низких температурах воздуха в ясную погоду: для профиля Руноу (длина хода 5,5 км, превышение 340 м) в октябре 1973 г. $\sigma_i = \pm 0,65$ мм/км. Введение температурной поправки по температуре воздуха при

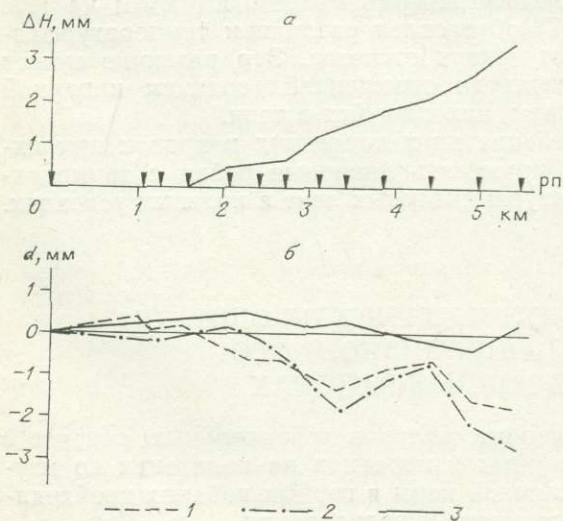


Рис. 1. Графики разностей отметок реперов (а) и накопления невязок в секциях (б), вычисленных с учетом температуры воздуха и реек по профилю Руноу в октябре 1973 г.

1 — по измеренным данным; 2 — с учетом температуры воздуха; 3 — с учетом температур задних и передних реек.

таких условиях может значительно ухудшить измеренные превышения, введение же температурной поправки по температуре передних и задних реек улучшает расхождение прямых и обратных ходов (рис. 1). Расхождение превышений прямых и обратных ходов (d , мм) и средняя квадратическая ошибка (m , мм/км) по измеренным данным равны соответственно $-1,67$ и $\pm 0,29$; с учетом температуры воздуха $-2,61$; $0,43$; с учетом температуры передней и задней реек $+0,22$; $0,16$.

Исключить или значительно уменьшить эту ошибку можно только непосредственным измерением температуры реек и введением по ней температурной поправки.

ОШИБКА ИЗ-ЗА НЕТОЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ α

В Гарме и Алма-Ате было произведено определение значений α для 14 комплектов реек. Работа выполнена с помощью компаратора Блейля и двух кварцевых жезлов в лабораторных условиях. Длины трехметровых интервалов, закрепленных наколами иглы, определялись в трех температурных диапазонах ($4-12$; $14-22$ и $26-37^\circ\text{C}$) не менее чем по 2 раза в каждом. Средняя квадратическая ошибка среднего значения α для одной рейки $m_\alpha = \pm 0,1$ мкм. При обработке результатов нивелирования использовали в основном значения α , взятые из таблиц ($\alpha = 0,5-2,5$ мкм/град для инвара). Результаты 14 нивелирований Талгарского полигона были перевычислены с новыми значениями коэффициентов линейного расширения двух комплектов инварных реек, использованных в работе на этом профиле: для реек 17 820—17 821 $\alpha = 2,0$ мкм/град (прежнее значение $1,6$ мкм/град); для реек 27 315—27 316 $\alpha = 1,8$ мкм/град (прежнее значение $2,0$ мкм/град).

Сравнение результатов нивелирования, вычисленных со старыми и новыми значениями α показало:

1. Разности отметок конечного репера хода достигают $1,5$ мм. Это свидетельствует о том, что применение неправильного значения α вносит в результаты нивелирования систематическую ошибку, причем ошибка в значении α , равная $0,4 \times 10^{-6}$ 1/град, будет соответствовать $\sigma_\alpha = \pm 0,06-0,21$ мм/км; $0,2 \times 10^{-6}$ 1/град будет соответствовать $\sigma_\alpha = \pm 0,01-0,07$ мм/км. Абсолютная величина этой систематической ошибки зависит от величины погрешности в определении α и величины разности температур нивелирования и эталонирования, а знак ее — от увеличения или уменьшения значения α и знака разницы температур нивелирования и эталонирования.

2. Для всех нивелирований расхождения превышений прямых и обратных ходов d в $17-69\%$ случаев улучшается в среднем на 8% (средняя квадратическая ошибка в таких случаях уменьшается на $5-13\%$) и в $19-53\%$ случаев не изменяется. Это свидетельствует о правильности определения значений α . В расхождениях превышений прямых и обратных ходов присутствует не вся ошибка σ_α , а только остаточная, нескомпенсированная часть ее, зависящая от разницы отклонений температуры нивелирования от температуры эталонирования в прямом и обратном ходах. Чтобы исключить эту ошибку при работе в горах, необходимо точное определение коэффициента линейного расширения реек.

ОШИБКА ИЗ-ЗА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТОЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ ДЛИНЫ МЕТРА РЕЕК

При работах в горах существенное систематическое влияние вызывает ошибка в определении среднего метра комплекта реек. Эта ошибка, оцененная в $12-15$ мкм [2], будет возрастать пропорциональ-

но превышению. В 1973 г. ИФЗ АН СССР был разработан метод полевого эталонирования с помощью компаратора Блейля и кварцевых жезлов. Ошибка в определении среднего метра комплекта реек этим методом равна $\pm 10\text{--}15$ мкм (максимально ± 30 мкм). По многочисленным результатам эталонирования реек были оценены следующие ошибки (мкм): а) метода передачи длины с жезлов на рейки — $\pm 1,4$; б) наблюдателя — $\pm 2,7$; в) характеризующая качество штрихов — $\pm 10,5$; г) нанесения штрихов для реек фирмы Цейсс до ± 23 , для реек завода ЭОМЗ до ± 42 . Ошибка в определении средней длины комплекта реек, равная ± 12 мкм, внесет в результаты нивелирования Талгарского профиля (длина хода 7 км, превышение 240 м) систематическую ошибку $\sigma_i = \pm 0,4$ мм/км. Знак и величина этой систематической погрешности зависят от знака и величины ошибки в длине метра комплекта реек. Для ослабления ошибки σ_i по инструкции по нивелированию [1] средняя длина метра комплекта реек для нивелирования 1-го класса в горных районах не должна отличаться от номинала более чем на 0,05 мм. Ошибка, характеризующая качество существующих штрихов нивелированных реек ($m_{\text{шт}} = \pm 10,5$ мкм), будет целиком входить в результаты нивелирования независимо от величины поправки в среднюю длину метра реек. Для исключения этой ошибки необходимо создать на высокоточных рейках несколько точных контрольных марок. Тогда ошибка средней длины метра будет в основном зависеть от ошибки нанесения штрихов, и это дает возможность для работ на линиях с большими уклонами отбирать рейки с минимальными отклонениями от номинальной длины.

ОШИБКА ЗА РЕФРАКЦИЮ

Вопросами рефракции и влиянием ее на нивелирование занимались исследователи различных стран. До настоящего времени нет единого мнения о характере и величине влияния рефракции на результаты нивелирования. Так как нет прибора, который бы непосредственно в каждой точке измерял коэффициент рефракции, то рефракция изучается косвенными методами, путем сравнения превышений, измеренных при разной погоде и различных длинах визирных лучей. Изучение теории рефракции, влияния внешних условий на искривление луча в воздухе, закона распределения температур в приземном слое воздуха привело к созданию формул учета нивелирной рефракции [5, 9].

С целью выявления характера и порядка величин ошибок за рефракцию в Гарме и Талгаре в 1972, 1973 гг. проведены первые работы. За время нивелирования Гармского полигона в августе — сентябре 1973 г. производилось измерение градиентов температур на каждой станции и вычислялись поправки по формуле Куккамаки. Результаты работ показали:

1. Градиенты температур на высотах 2,5 и 0,5 м в основном не больше 1°C . Знак градиентов и в утренние, и в вечерние часы видимости колебался.

2. Величины поправок за рефракцию на станции не превышали $\pm 0,02$ мм. Так как длины визирных линий хода небольшие (в среднем 20 м) и ход замкнутый с чередованием положительных и отрицательных превышений в нем самом и отдельных секциях, то поправки за рефракцию часто компенсировались и в секциях они оценивались в $0 \div \pm 0,08$ мм.

3. Наибольшая поправка $\rho = +0,08$ мм в секции с монотонным подъемом с превышением 36 м. В Талгаре были измерены температурные градиенты на нескольких станциях в каждой секции и вычис-

лен средний температурный градиент в секции. На этом профиле температурные градиенты лежали в пределах $0,2-1,1^{\circ}\text{C}$. Преобладал отрицательный температурный градиент. Средняя поправка за рефракцию на станции $\rho_{\text{ст}} = +0,003$ мм. Так как нивелирный ход в Талгаре имеет один уклон и один преобладающий тип распределения температур, то при 170 штативах во всем ходе $\rho = 0,003 \times 170 = 0,5$ мм, что соответствует систематической ошибке $\sigma_{\rho} = +0,07$ мм/км (длина хода 7 км).

Для получения точных характеристик влияния рефракции на полигонах в Средней Азии необходимы тщательные работы в различных погодных условиях.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ СКАЛЬНОГО РЕПЕРА

При изучении вертикальных смещений земной поверхности нивелирные ходы закрепляются грунтовыми и скальными реперами. Реперы несут количественную информацию о движениях поверхности в данной точке. Считается, что наиболее устойчивы скальные реперы, меньше всего подверженные влиянию экзогенных процессов. Очень часто на геодинамических полигонах за исходный пункт выбирают скальный репер.

В сентябре 1973 г. и августе — сентябре 1974 г. в Гарме проведены исследования по выявлению температурных деформаций реперов.

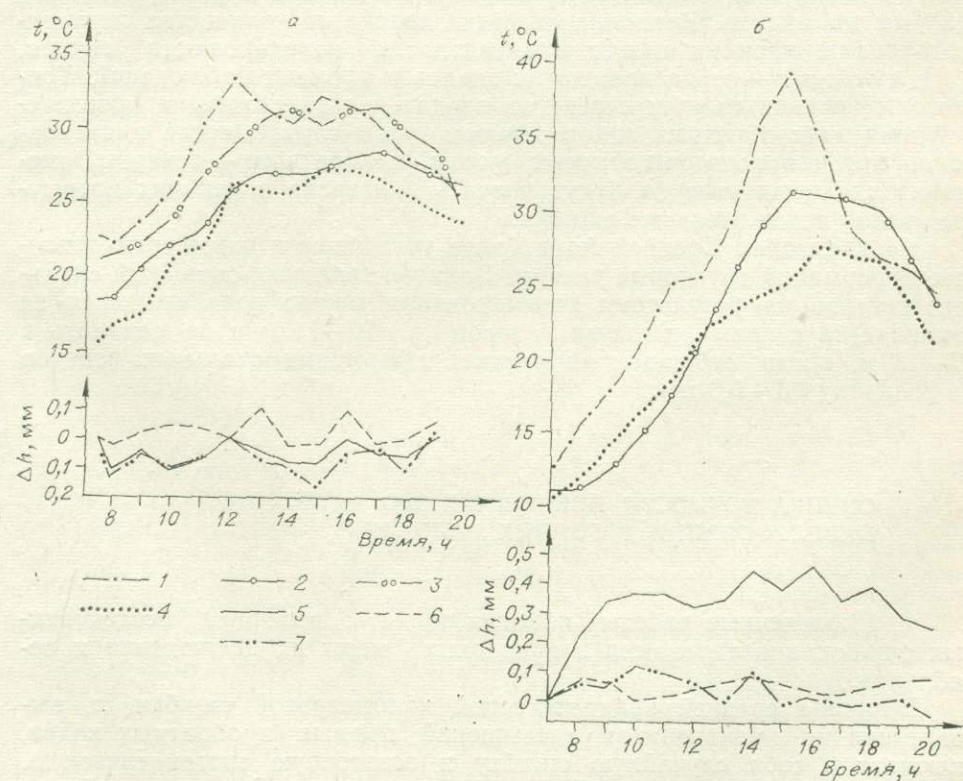


Рис. 2. Графики изменения превышений между нивелирными точками с ходом температуры при исследовании деформаций скального репера на Гармском полигоне в облачную (а) и солнечную (б) погоду.

1—4 — температура (1 — камня, 2 — почвы у грунтового и 3 — у скального реперов, 4 — воздуха); 5—7 — превышение (5 — между скальным и грунтовым реперами, 6 — между штырями, 7 — между грунтовым репером и штырем).

С этой целью с 7 до 20 ч через каждый час выполняли нивелирование скального и грунтового реперов и двух постоянно закрепленных штырей, расположенных в 1,0—1,5 м от скального и грунтового реперов с измерением температуры воздуха, камня, почвы. Скальный репер заложен в коренные гранитные выходы горы Миндалюль, грунтовой репер — в супесчаный грунт в 35 м от скального репера. Превышение между ними 0,9 м, между штырями 0,4 м.

В облачную и пасмурную погоду максимальные колебания дневных температур не превышают 12°C , а изменения всех превышений значопеременны и лежат в пределах 0,1—0,2 мм (рис. 2, а). В солнечную погоду в августе—сентябре колебания температуры воздуха, камня и почвы $15\text{--}25^{\circ}\text{C}$, максимальная температура воздуха не превышает 32°C , а камня и почвы — 43°C в 14—17 ч. Превышения между штырями, грунтовым репером и штырями колеблются около среднего значения с амплитудой, не превышающей 0,1 мм. Превышение между скальным и грунтовым знаками имеет заметный ход, связанный с изменением температуры: с 7 до 16—17 ч превышение возрастает на 0,25—0,45 мм и от 16—17 до 20 ч уменьшается в среднем на 0,2 мм. С 7 до 11 ч скальный репер поднимается на 0,1—0,3 мм, а вечером опускается в среднем на 0,15 мм (рис. 2, б).

Анализ действия перемещения скального репера на результаты нивелирования (при средних значениях изменений положения скального репера в периоды наблюдений) показал, что температурные деформации скальных реперов вносят в результаты нивелирования в солнечную погоду систематическую ошибку. По нашим данным, это 0,1—0,25 мм на секцию. Величина ошибки зависит от количества получаемого тепла, времени и продолжительности нивелирования секции, а знак ошибки — от расположения знаков и времени наблюдений. Тепловые смещения скальных реперов входят и в расхождения превышений прямых и обратных ходов. При этом в том случае, когда нивелирование прямого хода выполняется утром, а обратного — вечером, смещения скальных реперов будут вносить в невязки в секциях преимущественно положительные ошибки.

На полигонах Средней Азии более устойчивы в отношении тепловых деформаций грунтовые реперы. Влияние тепловых смещений скальных реперов на результаты нивелирования можно ослабить, если не заканчивать секцию скальных реперов в 10—11 ч и не начинать в 17—18 ч, когда наблюдаются резкие деформации скальных реперов на величину 0,1—0,3 мм.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРЕЦИЗИОННОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ

Проведенные работы помогли оценить величины исследованных ошибок нивелирования и предложить меры их исключения и ослабления.

Величина средней квадратической километровой ошибки m , вычисленная по расхождениям превышений прямых и обратных ходов, включает в себя случайную ошибку и остаточную систематическую, нескомпенсированную в прямых и обратных ходах. В горных районах при больших уклонах возрастают систематические ошибки нивелирования и часто величины их значительно превышают величину m .

Как показано выше, неучет исследованных ошибок внесет в результаты нивелирования большие систематические ошибки. Для Талгарского полигона они будут оцениваться следующими величинами:

Систематические ошибки	Среднее значение	Максимальное значение
Из-за неправильного учета температур реок σ_t , мм/км	0,3	1,0
Из-за использования при введении температурной поправки неправильного значения σ_a , мм/км	0,1	0,2
Из-за использования неправильного значения длины среднего метра комплекта реок σ_l , мм/км	0,4	1,0
Из-за рефракции σ_p , мм/км	0,1	0,1
Из-за тепловых деформаций скальных реперов σ_h , мм/сек	0,2	0,25

Эти ошибки, изменяя превышения прямого и обратного ходов, в невязках частично компенсируются. Учет ошибок уменьшает невязки и вычисленные по ним значения m . Причем остаточная часть ошибок σ_t и σ_a составляет приблизительно 0,1 m каждая. Ошибка в определении среднего метра реок не влияет на величину m . Влияние рефракции на расхождения превышений прямых и обратных ходов не оценено из-за недостаточного количества данных. Температурные деформации скальных реперов могут ухудшить невязку в секции на величину $\pm 0,1$ —0,4 мм. В продолжительном ходе влияние тепловых смещений скальных реперов не оценено. Считая, что остаточная, некомпенсированная часть влияния систематических ошибок составляет 20—30% m , случайная километровая ошибка η будет составлять основную часть m и в среднем $\eta = \pm 0,2$ —0,4 мм/км. Систематическая километровая ошибка будет складываться из суммы отдельных источников ошибок $\sigma = \sigma_t + \sigma_a + \sigma_l + \sigma_p + \sigma_h$. При средних значениях каждого источника ошибок для Талгара $\sigma = 1,0$ мм/км ($\sigma \approx \pm 2,8$ мм на 100 м превышения). При неблагоприятных условиях в отношении всех источников систематических ошибок, что, вероятно, крайне редко, величина σ может увеличиваться до 2,5 мм/км (в том случае, если знак всех систематических ошибок одинаков).

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. М., «Недра», 1974.
2. Мецкерский И. Н., Энтин И. И. Ошибки нивелирования, вызванные применением инварных реок.— «Труды ЦНИИГАиК», 1962, вып. 147.
3. Одинов Н. Н., Налетов В. А. Электротермометр для определения интегральной температуры инварной полосы нивелирной рейки.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
4. Одинов Н. Н., Певнев А. К., Энман С. В. Новые результаты исследования влияния температуры инварных полос реок на результаты нивелирования в горной местности на Талгарском полигоне.— В кн.: Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. Алма-Ата, 1973.
5. Павлов Н. А. Исследования влияния рефракции на результаты нивелирования в производственных условиях.— «Труды ЦНИИГАиК», 1940, вып. 9.
6. Певнев А. К., Энман В. Б., Энман С. В., Одинов Н. Н. Влияние солнечного нагрева реок на результаты нивелирования.— В кн.: Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. Ташкент, «Фан», 1972.
7. Турм Х. Некоторые виды систематических ошибок при высокоточном нивелировании.— «Иенское обозрение», 1971, № 3.
8. Энман С. В. Систематическая ошибка высокоточного нивелирования, вызванная тепловым изменением длины реок.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1975.
9. Kukkamäki T. J. Formeln und Tabellen zur Berechnung der nivellischer Refraktion. Veröffentlichungen des Finnischen Geodätischen Instituts, Nr. 27. Helsinki, 1939.

УЧЕТ ДИНАМИКИ ВИЗИРНОГО ЛУЧА ПРИ ВЫСОКОТОЧНЫХ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ И АЗИМУТАЛЬНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЯХ

Требования к точности построения геодезических сетей и в особенности сетей, создаваемых на геодинимических полигонах с целью изучения современных движений земной коры, непрерывно возрастают. Так как последующее повышение точности построения этих сетей при прочих равных условиях зависит в первую очередь от точности проводимых в них измерений, то перед геодезистами стоит задача непрерывного повышения точности всех видов астрономогеодезических измерений, исполняемых в таких сетях.

При использовании современной высокоточной измерительной техники одним из существенных источников ошибок при астрономо-геодезических измерениях, в частности при определении азимутов на пунктах Лапласа и измерении горизонтальных углов в триангуляции, является, как известно, влияние боковой рефракции. Максимальные ошибки в углах и азимутах из-за влияния боковой рефракции достигают иногда 3—7". Средняя же квадратическая величина этих ошибок при измерении углов в триангуляции 2-го класса равна в среднем 0,5", а при определении азимутов на пунктах Лапласа — 0,6—0,8". Такие ошибки в углах и азимутах слишком большие и должны быть возможно полнее исключены из результатов наблюдений.

В целях ослабления влияния боковой рефракции предлагаются различные решения, например разработка рефрактометров для непосредственного измерения углов рефракции, сочетание дневных и ночных наблюдений, растягивание наблюдений на несколько дней с различными условиями погоды и др. Однако рефрактометров для измерения углов рефракции с требуемой точностью 0,1—0,2" еще нет, постановка ночных наблюдений углов экономически не оправдана и не дает желаемых результатов как и многие другие предложения.

В настоящей работе обсуждается простой по идее, экономически выгодный и в то же время эффективный метод, почти полного исключения влияний боковой рефракции из результатов наблюдений углов и азимутов в геодезических сетях.

Рассмотрим сначала основные теоретические положения данного метода. Как известно, в каждый фиксированный момент времени t мы измеряем не искомое направление AB (угол α_t , отсчитываемый от нулевого штриха лимба теодолита), а совсем другое направление AB_i (угол α_{t_i}), совпадающее с касательной к световой кривой в точке A приема светового сигнала, идущего от наблюдаемой точки B (рис. 1). Угол δ_{t_i} в плоскости горизонта между касательной AB_i и искомым направлением AB есть угол боковой рефракции (боковая рефракция).

Поправка δ за рефракцию в измеренное в момент времени t направление α_t может быть с практически достаточной точностью выражена через метеорологические элементы и их градиенты [2]:

$$\delta = \sigma + \varepsilon, \quad (1)$$

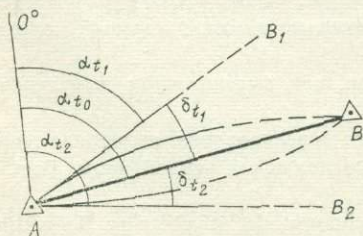


Рис. 1. Изменение величины α_t измеряемого направления AB_i под воздействием суточного хода боковой рефракции δ : $\alpha_{t_1} \rightarrow \alpha_{t_0} \rightarrow \alpha_{t_2} \rightarrow \alpha_{t_3} \rightarrow \alpha_{t_4}$

$$\sigma = \frac{21,7}{S' \sin Z} \int_0^S \frac{p}{T^2} \frac{\partial T}{\partial H} \operatorname{tg} \gamma \sin(A - Q)(S - y) dy, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{0,74}{S \sin Z} \int_0^S \frac{p}{T^2} \operatorname{tg} \gamma \sin(A - Q)(S - y) dy. \quad (3)$$

В этих формулах S — длина визирного луча по хорде (м); y — расстояние по той же хорде от начальной точки луча до текущей (м); p — давление (мм); T — абсолютная температура воздуха (К); $\frac{\partial T}{\partial H} \approx \frac{T_2 - T_1}{H_2 - H_1}$ — вертикальные градиенты температуры воздуха (град/м); $\operatorname{tg} \gamma$ — наклоны к горизонту эквискалярных поверхностей одинакового показателя преломления воздуха $n = \text{const}$ при этом угол γ отсчитывается от точки зенита до вектора градиента ∇n , направленного в сторону уменьшения $n = n(X, Y, Z)$; A и Q — азимуты соответственно визирного луча S и вектора градиента ∇n ; z — зенитное расстояние наблюдаемой цели; ∇ — оператор Гамильтона. В данных формулах величины $\frac{\partial T}{\partial H}$ и $\operatorname{tg} \gamma$ по определению имеют противоположные знаки.

В работе [3] показано, что величину и знак боковой рефракции почти полностью определяет составляющая σ , отражающая влияние ее местных полей (поле градиента ∇n), так как вторая составляющая ε , отражающая незначительное по модулю влияние ее областных (почти однородных) полей, мала по сравнению с σ . Так как наклоны $\operatorname{tg} \gamma$ и рефракция δ функционально связаны с вертикальными градиентами тем-

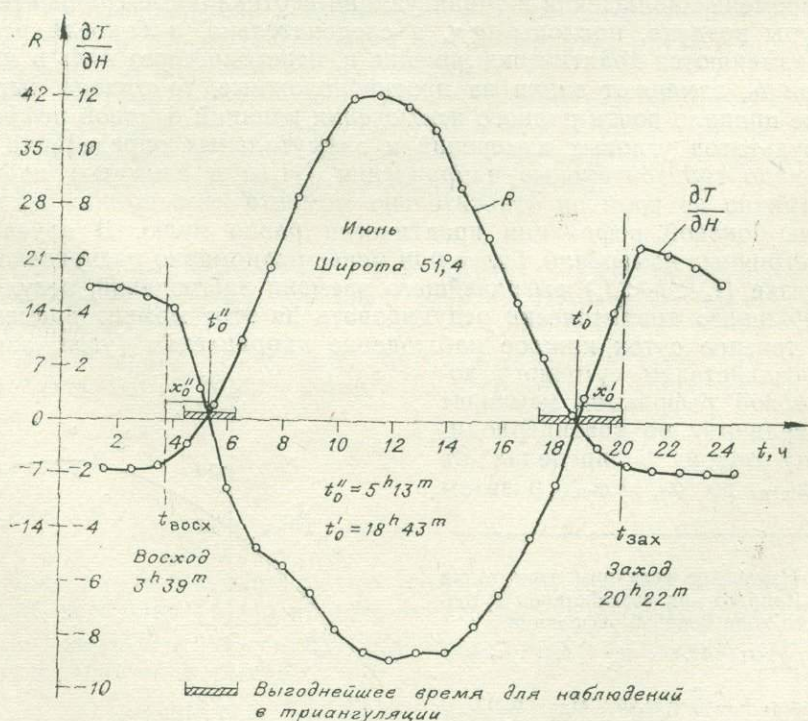


Рис. 2. Суточный ход радиационного баланса R (кал/см²·ч) и вертикальных градиентов температуры воздуха $\frac{\partial T}{\partial H}$ (град/100) на высоте метеобудки в открытой местности (среднее за июнь).

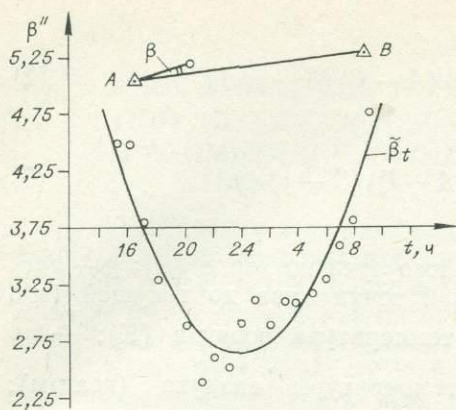


Рис. 3. Изменение измеренного угла β под воздействием суточного хода боковой рефракции.

Кружок — значение угла β из измерений; β_t — аппроксимирующая функция; $\eta_{\beta/t}$ — корреляционное отношение.

$$\beta \approx 0^{\circ}01'; m_{\beta} = 0,25''; S_{AB} = 5,2 \text{ км}; \tilde{\beta}_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2; m_{\tilde{\beta}_t} = 0,11; \eta_{\beta/t} = 0,94.$$

но, и измеряемые направления (углы и азимуты) также испытывают суточный ход [1] (рис. 3 и 4).

В нижнем 300-метровом слое атмосферы, где проходит основная масса визирных лучей в геодезических сетях, вертикальные градиенты температуры воздуха $\frac{\partial T}{\partial H}$ и связанные с ними наклоны $\tan \gamma$, а следовательно, и боковая рефракция δ в суточном ходе их дважды переходят через нуль вечером и утром при высоте солнца $6-14^{\circ}$ в моменты времени t'_0 и t''_0 , изменяя при этом всякий раз знаки на противоположные (см. рис. 2). В средних широтах утренняя «изотермия» воздуха наступает через 1—2 ч после восхода солнца, а вечерняя — за 1—2 ч перед заходом.

Так как на двух-трехчасовом отрезке так называемого выгоднейшего времени наблюдений в триангуляции вертикальные градиенты температуры воздуха, наклоны $\tan \gamma$, а следовательно, и боковая рефракция δ изменяются практически линейно и, переходя через нуль в момент времени t_0 , изменяют знаки на противоположные, то отсюда вытекает простое правило почти полного исключения влияний боковой рефракции из результатов угловых измерений и азимутальных определений. Для этого надо горизонтальные направления (углы и азимуты) измерять симметрично во времени относительно момента «изотермии» t_0 , когда влияние боковой рефракции практически равно нулю. В случае же асимметричных измерений, более или менее равномерно распределенных на отрезке $(t_n < t_0 < t_k)$ выгоднейшего времени наблюдений, результаты их необходимо аналитически редуцировать на этот момент времени t_0 .

В течение суток каждое наблюдение направления (угол, азимут) под воздействием суточного хода боковой рефракции изменяет свою величину по квазипериодическому закону в пределах от $\alpha_{t_1} = \alpha_{\min}$ до $\alpha_{t_2} = \alpha_{\max}$ и затем

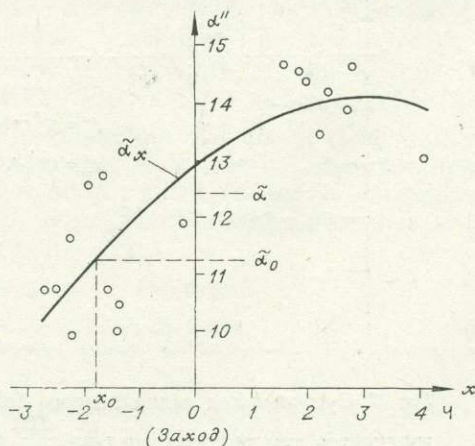


Рис. 4. Изменение величины азимута на пункте Лапласа под воздействием суточного хода боковой рефракции.

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum \alpha_i = 12,45''; m_{\bar{\alpha}} = 0,41''; \tilde{\alpha}_0 = a_0 + a_1 x_0 + a_2 x_0^2 = 11,25''; m_{\tilde{\alpha}_0} = 0,31''.$$

Влияние рефракции на среднее значение азимута: $\delta \cong \bar{\alpha}_0 - \bar{\alpha} = -1,20''$. Кружок — значения азимута из наблюдений; $\tilde{\alpha}_x$ — аппроксимирующая функция.

в обратной последовательности: от $\alpha_{\max}$ до $\alpha_{\min}$. В момент времени t_0 оно принимает искомое значение $\alpha_0 = \alpha_{t_0}$, которое и подлежит определению из наблюдений или вычислений (см. рис. 1).

В общем случае временной ход измеренной на заданном отрезке суток ($t_n < t_0 < t_k$) какой-либо величины α (угла, азимута) может быть выражен интегральной формулой

$$\alpha_t = \alpha_{t_0} + \int_{t_0}^t f(t) dt, \quad (4)$$

откуда искомый результат α_{t_0} , свободный от влияний боковой рефракции, будет равен

$$\alpha_{t_0} = \alpha_t + \int_{t_0}^t f(t) dt. \quad (5)$$

Применение этих формул на практике встречает определенные трудности, так как направления, углы и азимуты измеряются дискретно, а подынтегральная функция $f(t)$ остается неизвестной. Однако это не меняет существа рассматриваемой задачи, так как выражение (4) можно заменить наиболее близко подходящей аппроксимирующей функцией $\tilde{\alpha}_t = F(\alpha, t)$ на заданном отрезке времени наблюдений ($t_n < t_0 < t_k$) и затем, зная t_0 , получить при $t = t_0$ искомый результат $\tilde{\alpha}_0 = \tilde{\alpha}_{t_0}$, практически свободный от влияния боковой рефракции.

Таким образом, задача по определению искомого результата в случае асимметричных наблюдений может быть сведена к постановке дискретных измерений α_t , выполняемых через более или менее равные интервалы на заданном отрезке выгоднейшего времени наблюдений ($t_n < t_0 < t_k$), вычислению коэффициентов аппроксимирующей функции $\alpha = F(\alpha, t)$ и определению момента «изотермии» t_0 , когда влияние боковой рефракции практически равно нулю.

Теоретические расчеты [4] показывают, что при обработке многократных наблюдений, исполняемых в вечерние и ночные часы, например, при определении азимутов, счет времени необходимо вести относительно момента захода солнца в условной системе:

$$x = t - t_{\text{зах}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{зах}}$ — декретное (местное) время захода солнца, вычисляемое по астрономическому ежегоднику, а t — декретное (местное) время наблюдений в приемах.

Время вечерней «изотермии» воздуха t_0 может быть для каждой даты наблюдений на пункте вычислено с требуемой точностью по формуле

$$t_0 = t_{\text{зах}} + x_0, \quad (7)$$

где

$$x_0 = -x'_0 + \epsilon'_h + \epsilon'_m. \quad (8)$$

Вычисления ведут с точностью до 0,01 ч. Многолетние величины x'_0 выбирают из таблиц [4] по широте пункта и дате наблюдений. Поправку ϵ'_h за эквивалентную высоту h визирного луча над местностью вычисляют в часах по формуле

$$\epsilon'_h = 1,30 h [1 - (0,6976 - 0,00264 \varphi) h + 0,064 h^2], \quad (9)$$

где эквивалентная высота h дана в сотнях метров, а широта пункта $40 \leq \varphi \leq 64^\circ$ — в градусах. Поправку ϵ'_m за метеорологические условия вычисляют по формуле [4].

В массовых работах по угловым измерениям в триангуляции момент «изотермии» целесообразно определять в процессе наблюдений, не прибегая при этом к каким-либо вычислениям. Для этого надо в период вечерних (утренних) наблюдений зафиксировать по часам в ясную погоду тот момент времени t_0 , когда колебания изображений визирных целей практически полностью прекращаются, так как в это время наблюдается состояние, наиболее близкое к изотермии. Затем приемы измерения направлений (углов и азимутов) надо распределить симметрично во времени относительно этого момента наиболее спокойных и четких изображений визирных целей и из полученных результатов взять среднее арифметическое, которое практически будет свободным от влияний боковой рефракции. Такой метод симметричных наблюдений в период спокойных изображений хорошо зарекомендовал себя на практике, в частности на Алма-Атинском геодинатическом полигоне.

При постановке асимметричных наблюдений должны быть предусмотрены меры, позволяющие получить с требуемой точностью коэффициенты аппроксимирующей функции $\tilde{\alpha}_i = F(\alpha, t)$ и момент «изотермии» x_0 , на который будут редуцированы результаты наблюдений. Отметим некоторые из них. Наблюдения должны начинаться не позднее чем за 1—1,5 ч до наступления момента «изотермии» и продолжаться после него. Приемы наблюдений должны быть более или менее равномерно распределены на всем отрезке выгоднейшего времени наблюдений ($t_n < t_0 < t_k$), причем в целом за все дни работы на пункте. Результаты измерений в каждом отдельном приеме должны быть получены с максимальной точностью, а число приемов должно быть не менее 15—18. Результаты наблюдений углов β или азимутов α в приемах представлены ниже (только секунды):

Время наблюдений, x_i	Значение угла	Значение азимута
x_1	β_1	α_1
x_2	β_2	α_2
...	...	...
x_n	β_n	α_n
Среднее: x	β	α

Редуцирование измеренных углов на момент «изотермии» выполняется по следующим формулам:

$$\beta_0 = \beta + \delta, \quad (10)$$

$$\delta = k(x_0 - x), \quad (11)$$

$$k = \frac{\sum \Delta x_i \Delta \beta_i}{\sum \Delta x_i^2}, \quad (12)$$

где $\Delta x_i = x_i - x$, $\Delta \beta_i = \beta_i - \beta$, β_0 — искомое значение угла; δ — поправка за рефракцию; k — часовое изменение угла.

Искомый азимут $\tilde{\alpha}_0$, редуцированный на момент «изотермии» x_0 , вычисляют по формуле

$$\tilde{\alpha}_0 = a_0 + a_1 x_0 + a_2 x_0^2. \quad (13)$$

Коэффициенты a_i находят из обработки данных наблюдений угол β или азимутов α по методу наименьших квадратов при условии $\sum v^2 = \min$, где

$$v_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 - \alpha_i. \quad (14)$$

Среднюю квадратическую ошибку m_{α_0} азимута α_0 вычисляют по формуле

$$m_{\alpha_0} = \mu \sqrt{c_{11} + 2c_{12}x_0 + (c_{22} + 2c_{13})x_0^2 + 2c_{23}x_0^3 + c_{33}x_0^4}, \quad (15)$$

где μ — ошибка единицы веса из уравнения; c_{ij} — элементы матрицы, обратной матрице коэффициентов нормальных уравнений, из решения которых находят коэффициенты a_j аппроксимирующей функции:

$$\tilde{\alpha}_i = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2. \quad (16)$$

В целях определения эффективности обсуждаемого здесь метода исключения влияний рефракции из результатов угловых измерений и азимутальных определений были на момент изотермии редуцированы горизонтальные углы в 88 треугольниках триангуляции 2-го класса и 42 астрономических азимута на пунктах Лапласа. Результаты редуцирования углов на момент изотермии воздуха можно представить в следующем виде:

Число треугольников	88
Средняя длина стороны триангуляции, км	12
Средняя квадратическая ошибка угла, вычисленная по невязкам треугольников ω до редуцирования углов на момент «изотермии» (m)	0,73"
То же, но после редуцирования углов на момент «изотермии» (m_0)	0,56"
Доверительная вероятность значимого различия дисперсий (m^2 и m_0^2)	0,98
Средняя квадратическая величина влияния боковой рефракции на точность измерения углов $m_{\text{реф}} \approx \sqrt{m^2 - m_0^2}$	0,46"
Увеличение веса измеренных углов после редуцирования их на момент «изотермии» $F = m^2 : m_0^2$	1,76

Приведем еще некоторые данные, полученные в результате обработки угловых измерений: $k_{\text{max}} = 3''/\text{ч}$, $k_{\text{ср}} = 0,7''/\text{ч}$; $(x_0 - x)_{\text{max}} = 2$ ч, $(x_0 - x)_{\text{ср}} = 0,4$ ч; $\delta_{\text{max}} = 2''$. Результаты редуцирования азимутов на пунктах Лапласа на момент «изотермии» воздуха $\tilde{\alpha}_0 = a_0 + a_1x_0 + a_2x_0^2$ можно представить следующим образом:

	1940 г.	1964—1968 гг.
Число обработанных азимутов	16	26
Средняя квадратическая ошибка азимута, вычисленная по расхождением d взаимно обратных азимутов до редуцирования их на момент «изотермии» $m_{\alpha} = \sqrt{\Sigma d^2/2n}$	0,77"	1,03"
То же, но после редуцирования азимутов в момент «изотермии» $m_{\alpha_0} = \sqrt{\Sigma d_0^2/2n}$	0,48"	0,66"
Доверительная вероятность значимого различия дисперсий m_{α}^2 и $m_{\alpha_0}^2$	0,90	0,90
Средняя квадратическая величина влияния боковой рефракции на точность определения азимутов на пунктах Лапласа $m_{\text{реф}} \approx \sqrt{m_{\alpha}^2 - m_{\alpha_0}^2}$	0,60"	0,80"
Увеличение веса определения азимутов после редуцирования их на момент «изотермии» воздуха $F = m_{\alpha}^2 : m_{\alpha_0}^2$	2,56	2,45

Расхождения взаимно обратных азимутов вычислены по формуле

$$d = (\alpha_{12} - \alpha_{21} \pm 180) - (\lambda_1 - \lambda_2) \sin \varphi_m.$$

ВЫВОДЫ

1. Все измеряемые в геодезических сетях направления, углы и азимуты испытывают под воздействием рефракции явно выраженный суточный и сравнительно небольшой годовой ход.

2. Суточный ход направлений, углов и азимутов необходимо учитывать как при организации и исполнении наблюдений, так и при математической обработке их результатов.

3. Результаты наблюдений углов и азимутов земных предметов необходимо тем или иным путем приводить на момент «изотермии», когда влияние боковой рефракции практически равно нулю.

4. Горизонтальные направления, углы и азимуты в геодезических сетях необходимо измерять в вечерний и утренний периоды наиболее спокойных и четких изображений визирных целей симметрично во времени относительно момента «изотермии» воздуха на высоте луча.

5. Результаты азимутальных определений на пунктах Лапласа, исполняемых асимметрично относительно момента «изотермии», необходимо аналитически редуцировать на этот момент времени.

6. Благодаря учету суточного хода измеряемых углов и азимутов путем приведения результатов наблюдений на момент «изотермии» удастся почти полностью исключить из них влияние боковой рефракции и за счет этого увеличить вес определения азимутов в среднем в 2,5 раза, а вес измерения углов — в среднем в 1,7 раза и тем самым заметно повысить точность определения взаимного положения геодезических пунктов на геодезических полигонах и получить достоверные данные о современных движениях земной коры из повторных наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев Н. В. Об учете климатологических особенностей города при угловых измерениях в городской триангуляции 1-го класса. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1960, вып. 6.
2. Яковлев Н. В. К теории рефракции оптического луча при высокоточных геодезических измерениях разного состава. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1969, вып. 3.
3. Яковлев Н. В. Условия, при которых боковая рефракция оптического луча стремится к минимуму. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1969, вып. 5.
4. Яковлев Н. В. Высокоточные угловые измерения и азимутальные определения в нестационарном поле боковой рефракции. Автореф. докт. дис. М., 1971.

Н. Н. Одинов

ОПЫТ СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ

Большинство линейных измерений на геодезических полигонах проведено с помощью светодальномера СГ-3, паспортная точность которого $m_D \leq \pm(4 + 1 \cdot D(\text{км}))$ мм, где D — измеренное расстояние. Рассмотрим возможные источники приборной ошибки для этого светодальномера:

Δf_0 — ошибка эталонной частоты $\leq \pm 1 \cdot 10^{-7}$; $\Delta_{\text{пост}}$ — ошибка в определении постоянной прибора и отражателя $= \pm 0,1$ мм; $\Delta_{\text{ц}}$ — ошибка центрирования $\leq \pm 0,5$ мм прибора и отражателя; $\Delta_{\text{сч}}$ — ошибка электронно-счетного блока ± 1 единица младшего порядка равна ± 1 мм.

Следовательно, ошибка единичного измерения в стабильной, известной атмосфере: $\Delta D \leq \pm(0,1 + 0,1 + 0,5 + 1 + 1 \cdot 10^{-7} D)$ мм $= \pm(2,2 + 1 \cdot 10^{-7} D)$ мм;

Ошибка ряда независимых измерений составит:

$$m_D \leq \pm(0,7 + 1 \cdot 10^{-7} D) \text{ мм.}$$

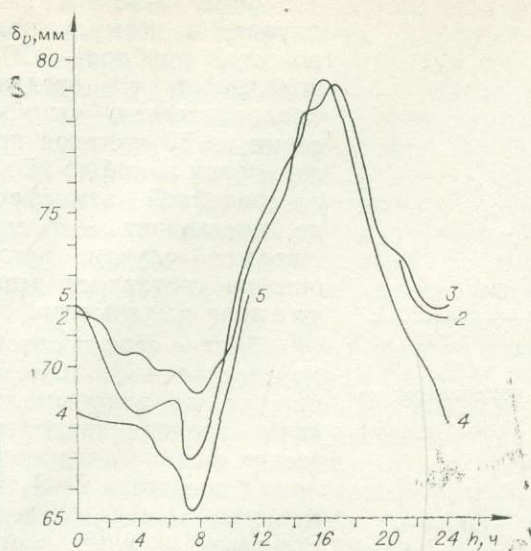


Рис. 1. Суточный ход метеопоправки для приземного слоя (линии 7—5 длиной 1 км).

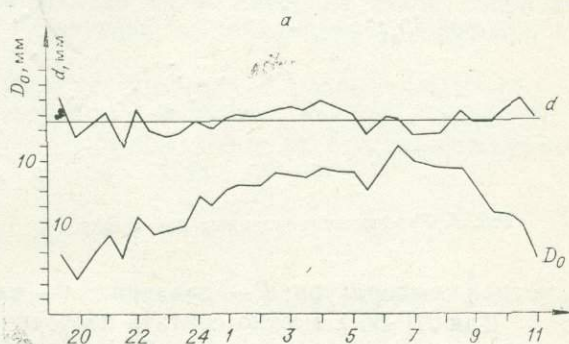


Рис. 2. Полная компенсация (а) на линии 7—5 ($\bar{d}=1024016,6 \pm \pm 0,8$ мм) и неполная компенсация (б) на линии 7—D ($\bar{d}=1120288,0 \pm 1,1$ мм).

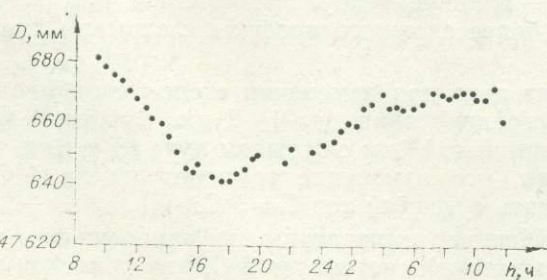
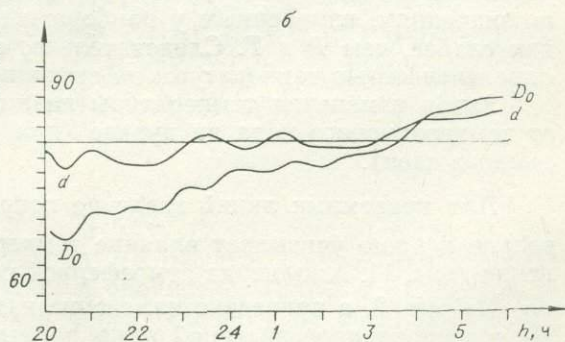


Рис. 3. Суточный ход изменений величины расстояния для линии 11 км.

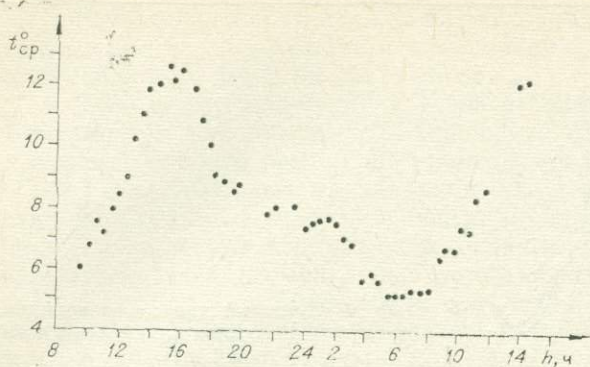


Рис. 4. Изменение температуры по измерениям на двух точках.

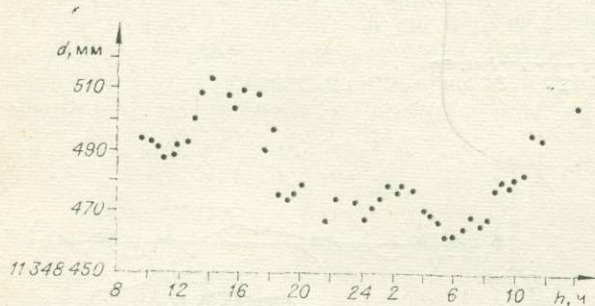


Рис. 5. График исправленных результатов.

Опыт 3-летней эксплуатации четырех комплектов приборов СГ-3 показывает, что средняя квадратическая ошибка серии из 10 отсчетов при измерении линий до 25 км в спокойной атмосфере не превышает ± 3 мм. Нередки случаи, когда ошибка составляет десятые доли миллиметра.

Однако если провести круглосуточные измерения, то на длинных линиях средняя квадратическая ошибка измерения может достигать 2—3 см. Эта ошибка определяется степенью известности среднеинтегрального показателя преломления света в атмосфере

$$n = f(\lambda, T, P, e),$$

где n — групповой показатель преломления; λ — длина волны оптического излучения; T — абсо-

лютная температура; P — давление; e — влажность.

Для ЛГ-56 λ можно считать постоянной, P с высокой степенью точности можно считать линейной функцией и оно хорошо определяется по значениям, измеренным у прибора и отражателя, e влияет на порядок слабее, чем P и T . Следовательно, основная ошибка вносится неопределенностью температуры на середине линии.

Закон изменения температуры на линии может сильно отличаться от температурного хода на пункте (при большом отрыве луча от приземного слоя).

Для приземных линий введение поправки за T как $\frac{T_{\text{гр}} + T_{\text{отр}}}{2}$ довольно хорошо учитывает влияние температуры на показатель преломления (рис. 1). Амплитуда атмосферной поправки $\delta_e = 14$ мм.

На рис. 2, а приведено изменение измеренных значений расстояния D_0 и исправленные значения d по данным на концах линии. Отклонение соседних измерений — влияние турбулентности. На рис. 2, б приведено то же для линии более сложного профиля с отрывом луча около 100 м.

Гораздо хуже обстоит дело при измерении сторон с отрывом луча от поверхности земли в середине линии до 1—2 км. Суточный ход изменений расстояния для линии ≈ 11 км с отрывом луча от земли ≈ 1 км приведен на рис. 3. Зная, что изменение температуры на 1°C дает $\approx 0,8$ мм/км, можно ожидать суточный ход $T = 5^\circ\text{C}$.

Однако (рис. 4) изменение температуры по измерениям на двух точках (у прибора и отражателя) составляет 8°C , что приводит к двукратному исправлению результатов (рис. 5).

Это легко объясняется тем, что средняя температура по трассе определяется как приземными участками (у прибора и отражателя), так и трассой над долиной с отрывом порядка 1 км (причем соотношение приземных участков и линии с большим отрывом $\approx 1:10$).

Расчет показывает, что суточный ход температуры воздуха на высоте луча над долиной составляет $\approx 4^\circ\text{C}$. По многочисленным литературным данным, амплитуда суточного хода температуры воздуха должна составлять $1\text{--}2^\circ\text{C}$ (для равнинных районов). Следовательно, термодинамические процессы на такого типа линиях характеризуются в $\approx 2\text{--}3$ раза большими амплитудами, что можно объяснить большей теплопроводностью и меньшей прозрачностью атмосферы (за счет запыленности).

На рис. 3 видно, что с 2 до 10 ч измеренные значения практически не изменяются ($\Delta T \leq \pm 0,5^\circ\text{C}$), хотя температура на пунктах за это время изменяется на 3°C и более (см. рис. 4). Естественно предположить, что между 4 и 8 ч температура на линии выравнивается с точностью $\approx 1^\circ\text{C}$, а измерения в это время позволяют получить точность $\pm 1 \cdot 10^{-6}$. Другой более надежный путь — самолетное зондирование в утренние часы и перенесение измерения температуры на ночные часы (до 2—3 ч). Для линий с отрывом луча от земли 2 км измерение температуры самолетом можно проводить до 12 ч. Введение такой поправки дает точность не хуже $2 \cdot 10^{-6}$ (за счет низкой аппаратурной точности самолетных термометров).

Использование самолетных термометров с разрешением $\pm 0,1\text{--}0,2^\circ\text{C}$, позволит получать точность в несколько единиц порядка 10^{-7} на длинных линиях с большим отрывом луча от подстилающей поверхности.

Ю. А. Крюков

ВОЗМОЖНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ОБРАБОТКИ, ХРАНЕНИЯ И ВЫДАЧИ РЕЗУЛЬТАТОВ НИВЕЛИРОВАНИЯ

На предприятии ГУГК при СМ СССР разработана и проходит производственные испытания 1-я очередь программного обеспечения автоматизированной системы обработки, хранения и выдачи результатов нивелирования (центр нивелирования) на базе ЭВМ М-222. Опыт показал, что система может успешно функционировать.

Основой системы является банк информации о нивелирной сети. Разработка автоматизированной системы ориентирована на нужды подразделений ГУГК. При разработке центра нивелирования как информационной системы принято, что основным типом запроса будут выпуски каталогов высот пунктов. Однако в центре нивелирования может быть реализован любой запрос, если информация хранится в информационном банке системы.

Создание информационного банка нивелирной сети позволяет автоматизировать решение задач, которые возникают при изучении современных движений земной коры. Существуют два основных направления изучения этих движений: на геодинамических полигонах и в крупных районах. С точки зрения автоматизации решения задач эти на-

правления имеют совершенно различные характеристики. На геодинамических полигонах сравнительно небольшое число секций, большое число повторных измерений, секции довольно стабильны (мало добавляется новых реперов). При изучении современных движений земной коры в больших районах приходится обрабатывать линии повторного нивелирования из тысяч секций, число повторных измерений 2—4, много реперов утрачивается при повторном нивелировании.

Автоматизировать решение задач, возникающих на геодинамических полигонах, сравнительно просто. Однако при обработке повторных нивелирований больших линий возникают проблемы. Главные из них: утраты реперов и анализ устойчивости реперов. При утрате репера фактически утрачивается секция, поэтому для сравнения измеренных превышений нужно образовывать сопоставимые участки нивелирных линий. Как автоматизировать этот процесс в настоящее время, не очень ясно: образовывать участки сравнения по схеме нивелирования и вводить эту информацию при запросе либо программно определять участки сравнения.

При анализе устойчивости репера иногда приходится привлекать информацию о месте закладки репера, геоморфологическую информацию, результаты обследования репера. Поэтому автоматизировать анализ устойчивости реперов довольно трудно. При создании банка информации о нивелирной сети страны, возможно, будут систематизироваться все повторные высокоточные нивелировки. Поэтому следует обратить внимание на разработку методики автоматизации анализа результатов повторных нивелировок.

При изучении современных движений земной коры на геополигоне целесообразно хранить информацию о нем на одной магнитной ленте (МЛ). Нивелирная сеть геополлигонов довольно стабильна и информация о ней может быть записана на той же МЛ. На ней же можно хранить любую информацию, которая относится к геодинамическому полигону и может быть использована при изучении движения земной коры на нем.

Задачи изучения движений земной коры на геополигоне, как правило, основаны на сопоставлении превышений, измеренных в разное время. Поэтому в запросе необходимо определить, какого периода измерения должны быть использованы для решения задачи. Информация о каждом повторном цикле нивелирования может быть записана под своим шифром и в запросе можно указать шифр работы и периоды времени для обоих циклов измерений.

Запись в банке информации результатов нивелирования и даты измерений позволяют реализовать в форме постоянных запросов системы решение следующих задач: вычисление разности превышений по секциям заданных циклов наблюдений; вычисление скорости движения земной коры для заданных точек по определенным циклам нивелирования, построение карты скоростей движения земной коры.

Автоматизация решения задач изучения современных движений земной коры может дать новые возможности для выполнения научно-исследовательских работ. Это обуславливается возможностью комплексного использования большого объема информации; быстрым доступом к комплексу информации о наблюдениях; возможностью использования трудоемких методов обработки и анализ результатов измерений.

При активном участии всех заинтересованных организаций можно ставить вопрос с созданием единого информационного центра «геодинамические полигоны». Задачей центра может быть сбор и систематизация результатов наблюдений, а также обслуживание запросов. Технической его основой могло бы быть программное обеспечение и комплекс технических средств автоматизированной системы обработки, хранения и выдачи результатов нивелирования.

ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ДАННЫХ
ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТ РЕПЕРОВ
МОРСКИХ УРОВНЕМЕРНЫХ ПУНККТОВ

На побережьях морей Советского Союза существует ряд пунктов Гидрометеослужбы, расположенных в среднем на расстоянии 200—500 км друг от друга, где на протяжении многих лет ведутся наблюдения за положением уровня моря. На многих пунктах наблюдения не прерывались в течение последних 25—40 лет, что обеспечивает довольно надежное определение среднего уровня моря в них. Непрерывность наблюдений позволяет фиксировать положение уровня на любую эпоху ряда. По данным многих уровнемерных наблюдений, выполненных в СССР и за рубежом, положение среднего уровня моря в точках морских побережий практически остается постоянным на протяжении многих лет. Существует, однако, медленное «эвстатическое» поднятие уровня мирового океана, вызванное увеличением объема воды от таяния льдов Арктики и Антарктиды, изменением емкости океана за счет поднятия суши и океанического дна и за счет выноса в океан материалов выветривания. Величина этого изменения незначительна, она вычислялась многими авторами различными методами. С 1954 г. ассоциацией физической океанографии МГГС эвстатическое поднятие уровня мирового океана было принято равным $+0,4$ мм/год.

Таким образом, надежно определенные среднесуточные уровни морей у побережий являются некоторой константой, которая может быть использована в геодезии. В частности, при наличии высотной связи ходов нивелирования с рабочими реперами уровнемерных постов (то же, что со средним уровнем моря) уровни морей можно использовать в качестве исходных вековых реперов при уравнивании нивелирных сетей и ходов. Причем уравнивание может проводиться в принятой исходной системе высот, для чего необходим независимый метод передачи высот между уровнемерными постами. Такой метод существует — метод водного нивелирования. Водным нивелированием называется передача высот от пункта к пункту по данным наблюдений над уровнем моря в этих пунктах. Водное нивелирование легко осуществляется между смежными уровнемерными постами при расстоянии до 300 км между ними. По исследованиям О. В. Якубовского, достижимая точность передачи высот методом водного нивелирования сопоставима с точностью геометрического нивелирования 1-го класса. Основное условие водного нивелирования вдоль морских побережий заключается в обеспечении изопотенциальной поверхности морского уровня, посредством которой происходит передача отметок от футштока к футштоку. Поверхность океана будет считаться изопотенциальной, если она сформирована только под воздействием силы тяжести. Но физическая поверхность воды в морях постоянно колеблется с периодами различной продолжительности под воздействием гидрометеорологических и астрономических факторов, которые в свою очередь изменяются во времени и пространстве. Задача состоит в том, чтоб снять влияние всех факторов, вследствие которых поверхность уровня в море вдоль берегов отступает от изопотенциальной. Влияние таких факторов, как разность атмосферного давления, изменение плотности воды, снимается путем введения соответствующих поправок, вычисленных по данным наблюдений за состоянием воды и атмосферы на уровнемерных пунктах. Приливо-отливные,

ветровые сгонно-нагонные и сезонные колебания снимаются путем осреднения результатов наблюдений за уровнем за многолетний период. Кроме того, существующие долгопериодические колебания уровня в 4,6; 8,8 и 18,6 лет, обусловленные влиянием притяжения Луны и Солнца, исключаются при осреднении за 20 лет [1]. На осредненный многолетний уровень оказывает влияние вертикальное движение берегов, проявляющееся в виде кажущегося подъема или спада уровня. Вертикальные движения берегов исключаются приведением ряда наблюдений в одной эпохе, т. е. значение уровня определяется за один и тот же период [2].

Таким образом, после обработки рядов наблюдений в каждом пункте с учетом всех вышеперечисленных факторов определяется среднемноголетняя поверхность уровня моря, близкая к изопотенциальной. Точность метода водного нивелирования зависит от точности приведения уровенной физической поверхности моря к уровенной поверхности силы тяжести. Следует отметить, что поверхность уровня морей имеет уклоны, которые выявляются при связи уровнемерных футштоков геометрическим нивелированием высокой точности, причем при этом в величины определяемых уклонов входят ошибки нивелировок. В настоящее время в Государственном океанографическом институте разрабатывается метод определения уклонов морей по океанографическим данным.

На открытых побережьях одной акватории на расстоянии по крайней мере 300 км величина уклона незначительна, в ряде случаев она не превышает ошибки нивелирования 1-го класса. При выполнении водного нивелирования в таких условиях ею пренебрегают.

Прежде чем показывать схему выполнения водного нивелирования, опишем вкратце устройство уровнемерного поста (пункта). Он включает в себя установки для измерения колебания уровня (рейки, мареографы, сваи с переносной рейкой) и высотную основу из 2 или 3 реперов, один из которых основной, другие рабочие. Основной репер должен быть фундаментальным, рабочие — рядовыми. Запись колебания уровня моря производится по уровнемерному устройству непрерывно. Уровнемерное устройство привязывается по высоте к рабочему реперу поста нивелированием 4-го класса, рабочие реперы в свою очередь привязываются к основному. Рейка, рабочие и основной реперы расположены на расстоянии 200—300 м друг от друга.

Положение уровня моря определяется относительно устойчивого фундаментального (основного) репера поста. Для облегчения вычислений и обеспечения положительного значения уровня в каждом пункте выбирается своя условная отсчетная поверхность — «0» поста, выше которого всегда будет находиться возможно наименьшее значение уровня в момент отлива. Положение «0» поста зафиксировано (условно) по отношению к основному реперу. Отметка основного репера, таким образом, дана над «0» поста. Положение уровня моря также пересчитывается через высотные связи уровнемерной рейки и реперов относительно «0» поста (рис. 1). Во многих случаях основные реперы постов включены в сеть государственного нивелирования и тогда отметки этих реперов, а с ними и «0» постов переводятся в Балтийскую систему высот (БС). Для выполнения водного нивелирования связь реперов всех уровнемерных постов с высотной государственной сетью необязательна. Водное нивелирование осуществляется следующим образом.

Высота репера над «0» поста H_0^I, H_0^{II} известна. По данным уровнемерных наблюдений в пунктах I и II определяется положение среднего многолетнего уровня моря относительно «0» поста L_0^I, L_0^{II} . Отметка репера относительно среднего многолетнего уровня будет:

$$\begin{aligned} H_0^I - L_0^I &= H_{ур}^I, \\ H_0^{II} - L_0^{II} &= H_{ур}^{II}. \end{aligned}$$

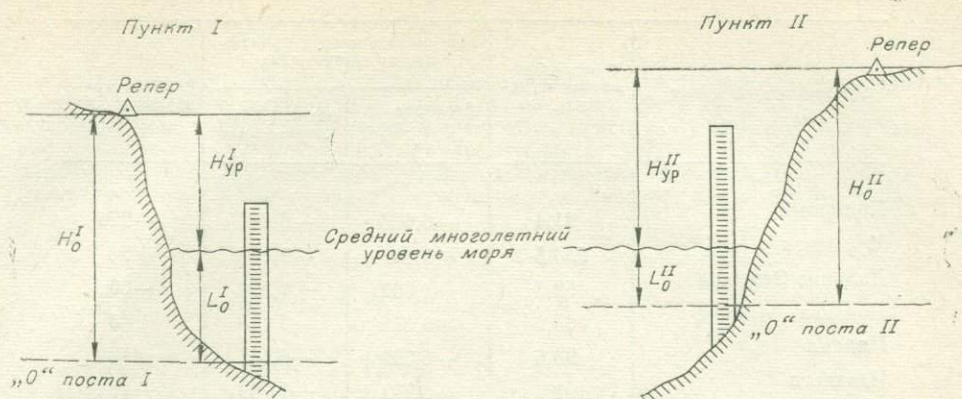


Рис. 1.

И поскольку средняя многолетняя поверхность приведена к изопотенциальной то отметки реперов постов вдоль побережья получены над этой изопотенциальной поверхностью и превышения между смежными реперами можно идентифицировать с превышениями, полученными геометрическим нивелированием между теми же реперами. Если какой-либо из постов надежно определен в исходной, например, в Балтийской системе, то, зная разницу систем местной данного поста и исходной, можно отметки реперов всех постов перевести в БС. Это обстоятельство важно для распространения исходной системы высот вдоль побережий морей на значительное расстояние независимым от геометрического нивелирования методом, что позволит уравнивать нивелирные сети или хода, опираясь на каркас из таких равномерных пунктов. Вопрос в том, какую точность передачи высот обеспечивает метод водного нивелирования.

Хорошим примером для анализа водного нивелирования служит Кольский полуостров (рис. 2). Здесь вдоль всего побережья проложено нивелирование 2-го класса (на рисунке штриховая линия), второклассный полигоен замкнут от Мурманска до Кандалакши ходом нивелирования 1-го класса (на рисунке двойная линия). Равномерно вдоль берега расположены уровневые пункты, где определено положение среднего многолетнего уровня моря за 1950—1960 и 1950—1970 гг. Основные реперы постов включены в линию государственного нивелирования 2-го класса. По всем уровневым постам нами определены высоты реперов над средней многолетней поверхностью моря. По смежным пунктам получены превышения между основными реперами постов водным и геометрическим нивелированием, что позволило сопоставить результаты двух методов. Данные сравнения показаны в таблице. Значение среднего многолетнего уров-



Рис. 2.

Уровнемерный пункт	Расстояние между пунк- тами, км	Превышения между пункта- ми, м, полученные		Разница пре- вышений, мм
		нивелировани- ем 2-го клас- са	водным ниве- лированием	
Полярный	91,4	—6,668	—6,661	—276
Мурманск	233,5	—9,800	—9,856	+56
Дальние Зеленцы	452,7	+4,532	+4,592	—60
Иоканга	463,9	—0,675	—0,718	+43
Пялица	93,6	—6,399	—6,441	+42
Чаваньга	91,3	+1,771	+1,789	—18
Кашкаранцы	106,8	—0,580	—0,632	+52
Умба	87,0	+2,837	+2,858	—21
Кандалакша				

ня моря вычислялось на эпоху проложения нивелирования 2-го класса — на 1960 г. Превышения, полученные водным нивелированием, мало отличаются от превышений нивелирования 2-го класса. Кроме того, замыкание ходов береговых нивелировок (водной и геометрической 2-го класса) ходом нивелирования 1-го класса дало невязки +28 и +66 мм соответственно. Таким образом, водное нивелирование дало невязку, почти вдвое меньшую, чем нивелирование 2-го класса. Это характеризует достаточно высокую точность передачи высот водным нивелированием по побережью Кольского полуострова. По результатам нивелирования 1-го класса, связывающего уровнемерные пункты Полярное и Кандалакша, была получена разность уровней морей в этих пунктах на эпоху 1970 г., величина ее равна +21 мм. Для выполнения водного нивелирования вдоль берега полуострова на расстояние 1620 км эта величина, дающая незначительный уклон уровенной поверхности моря, пренебрежимо мала.

Анализ результатов измерений, выполненных на Кольском полуострове, показывает на высокую точность метода водного нивелирования. Это дает право считать метод пригодным для надежной передачи высот по береговой линии моря на большие расстояния без проложения ходов геометрического нивелирования.

При наличии связи одного или нескольких пунктов с исходной системой высот метод дает возможность передавать исходную систему вдоль побережий независимо от геометрического нивелирования, что позволит уравнивать высотные сети, связанные с уровнемерными пунктами, в единой системе высот.

Поскольку уклоны морей, входящие ошибкой в определение среднего многолетнего уровня моря, получают геометрическим нивелированием, необходимо уровнемерные данные и имеющиеся данные геометрического нивелирования, выполненного между мареографами, уравнивать совместно.

Высоты пунктов, определенные водным нивелированием, могут служить контролем для ходов нивелирования 2-го класса, проложенных между этими пунктами.

Выполненный анализ носит предварительный характер, предполагается продолжить работу и выполнить обработку и анализ океанографических и геодезических данных по всем морям, омывающим территорию СССР.

1. Победоносцев С. В., Наумов Я. В. Об использовании океанографических исследований в геометрическом нивелировании. — «Геодезия и картография», 1973, № 3.
2. Руководство по гидрологическим исследованиям в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях. М., Гидрометеониздат, 1972.
3. Якубовский О. В. Исследование вертикальных движений земной коры на побережье Балтийского моря методом водного нивелирования. Автореф. канд. дис. М., 1966.

В. К. Панкрусин, С. С. Челпанов, А. П. Кириенко

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ КОРРЕЛЯЦИИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

При высокоточном нивелировании измеряют четыре превышения: h_1 и h_2 — левое и правое прямого хода, h_3 и h_4 — левое и правое обратного хода. Оценку точности нивелирования выполняют по формуле Д. А. Ларина [2] с использованием следующих разностей:

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= h_2 - h_1, \quad d_2 = h_4 - h_3, \\ d_3 &= h_2 - h_4, \quad d_4 = h_1 - h_3, \\ d_5 &= \frac{1}{2} (h_1 + h_2) - \frac{1}{2} (h_3 + h_4), \\ d_6 &= \frac{1}{2} (h_2 + h_4) - \frac{1}{2} (h_1 + h_3). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Без учета статистической зависимости между ошибками измеренных четырех превышений результаты такой оценки точности не достоверны и колеблются от 0,3 до 0,6 мм/км [1].

Очевидно, что без учета статистической зависимости ошибок измерений внутри одной эпохи и между разными эпохами не может быть выполнена и достоверная оценка точности вертикальных смещений земной поверхности.

По результатам многократного нивелирования 1-го класса (в 25 эпохах) на Ашхабадском геодинатическом полигоне получены матрицы коэффициентов корреляции

$$K = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ & & K_{33} & K_{34} \\ & & & K_{44} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Элементы матрицы вычислялись по известной формуле теории вероятности

$$K_{ij} = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})(h_j - \bar{h})}{\sigma_i \sigma_j}, \quad (i, j = 1, 2, 3, 4).$$

Средние коэффициенты K_{12} и K_{34} имеют положительные знаки и близки к единице; коэффициенты K_{13} , K_{14} , K_{23} , K_{24} изменяются от $-0,3$ до $+0,3$ и зависят от направления нивелирной линии.

Такие же результаты были получены при использовании методики, изложенной в работе [1]. В соответствии с этой методикой составлялось 21 уравнение корреляционных моментов величин d, a_μ как функций измеренных превышений (1). Из решения этой системы уравнений определялась матрица (2).

Для нахождения коэффициентов корреляции, характеризующих степень зависимости между превышениями, измеренными в I и II эпохи, составлялось 36 уравнений моментов $d^I_\nu a^{\text{II}}_\mu$ ($\nu, \mu = 1, 2, \dots, 6$). Из решения такой системы уравнений получена матрица коэффициентов корреляции

$$K^{I, \text{II}}_{ij} \left\{ \begin{array}{cccc} K^{I, \text{II}}_{11} & K^{I, \text{II}}_{12} & K^{I, \text{II}}_{13} & K^{I, \text{II}}_{14} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K^{I, \text{II}}_{41} & K^{I, \text{II}}_{42} & K^{I, \text{II}}_{43} & K^{I, \text{II}}_{44} \end{array} \right\}, \quad (3)$$

в которой каждый элемент K_{ij} характеризует зависимость между i -м превышением I эпохи и j -м превышением II эпохи.

Кроме того, составлялось 36 уравнений моментов величин $(d^{\text{II}} - d^I)_\nu \cdot (d^{\text{II}} - d^I)_\mu$. В результате их решения была получена матрица $K^{I, \text{II}}$ вида (3).

Интервалы для коэффициентов корреляции между ошибками измерений двух каких-либо эпох на Ашхабадском полигоне получились следующими: $-0,95$; $+0,95$ для линий длиной менее 3 км; $-0,5$; $+0,5$ для линий порядка 10 км и $-0,2$; $+0,2$ для линий порядка нескольких десятков километров.

Оценку точности нивелирования с учетом корреляции ошибок измерений предлагается выполнить по одной из следующих формул:

$$m_{\bar{h}}(K) = m_{\bar{h}} \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{2} \sum_A K}{2(1 - K_{ij})}}, \quad m_{\bar{h}}(K) = m_{\bar{h}} \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{2} \sum_A K}{1 + \frac{1}{2} \sum_B K}}, \quad (4)$$

где $m_{\bar{h}}$ — ошибка нивелирования без учета корреляционной зависимости, полученная по формуле Д. А. Ларина [2]; $\sum_A K = K_{12} + K_{13} + K_{14} + K_{23} + K_{24} + K_{34}$; $\sum_B K = K_{12} - K_{13} - K_{14} - K_{23} - K_{24} + K_{34}$ при использовании для оценки разностей d_s , $\sum_B K = -K_{12} + K_{13} - K_{14} - K_{23} +$

$+K_{24} - K_{34}$ при использовании разностей d_6 ; первая формула применяется при использовании разностей d_1, d_2, d_3, d_4 .

Оценка точности по формулам (4) дает практически одни и те же результаты при использовании любых разностей превышений (1).

Оценку точности смещений реперов между двумя эпохами $\Delta h_{I, \text{II}} = \bar{h}_{\text{II}} - \bar{h}_I$ с учетом корреляции ошибок предлагается выполнять по формуле

$$m_{\bar{h}_{I, \text{II}}}^2 = m_{\bar{h}_I}^2(K) + m_{\bar{h}_{\text{II}}}^2(K) - \frac{1}{8} m_{\bar{h}_I}(K) m_{\bar{h}_{\text{II}}}(K) [S^T K^{I, \text{II}} S]. \quad (5)$$

Здесь ошибки $m_{\bar{h}_I}(K)$ и $m_{\bar{h}_{\text{II}}}(K)$ вычисляются по формулам (4), $K^{I, \text{II}}$ — матрица (3), S — матрица-столбец, все элементы которой равны 1.

Очевидно, что

$$\frac{1}{8} [S^T K^{I, \text{II}} S] = 2\bar{K}_{I, \text{II}}, \quad (6)$$

где $\bar{K}_{I, \text{II}}$ — коэффициент корреляции между ошибками средних превышений I и II эпох.

Коэффициенты корреляции $\bar{K}_{I, II}$ были получены также из решения уравнения

$$m_{I, II}^2 = m_{hI}^2(K) + m_{hII}^2(K) - 2\bar{K}_{I, II} m_{hI}(K) m_{hII}(K). \quad (7)$$

При этом значения $m_{I, II}$ вычислялись на основе упомянутой выше формулы Д. А. Ларина [2], но по разностям разностей $(d^{II} - d^I)_\nu (d^{II} - d^I)_\mu$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крюков Ю. А. Оценка точности высокоточного нивелирования.— В кн.: Современные движения земной коры. Вып. 5. Тарту, Изд-во АН ЭССР, 1973.
2. Ларин Д. А. Об оценке точности нивелирования.— «Геодезия и картография», 1965, № 8.

Н. П. Есиков, В. С. Юдин

ЭФФЕКТ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ АЗИМУТА И ДЛИНЫ БАЗИСА В КОМПОНЕНТАХ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При изучении современных движений земной коры необходимо использовать теоретические представления, связанные не только со скалярными и векторными полями, но и с тензорными полями по крайней мере второго ранга.

Традиционное описание современных движений векторными схемами смещений не дает полного представления об очень важных особенностях движений, так как, согласно принципу Коши, в общем случае движения могут представлять суммарный эффект параллельного переноса участков коры, их вращательного движения как твердых тел и чистой деформации, под которой, как известно, понимают относительное изменение объема или площади (дилатация) и формоизменение. Последние характеристики важно знать при решении различных задач научного и прикладного значения.

По результатам повторных наблюдений планового положения пунктов геодезических сетей можно построить различные схемы смещений в зависимости от того, какой из пунктов сети принят за начало координат, т. е. векторные схемы смещений не являются инвариантными относительно координатной системы. С точки же зрения теории, величины, имеющие геометрический смысл, должны быть инвариантными относительно системы координат и, в частности, относительно их начала, так как только на основе инвариантных величин можно познать объективные пространственно-временные закономерности движений, а стало быть и их связи с другими геофизическими явлениями.

Поэтому важной задачей описания и анализа результатов повторных геодезических наблюдений становится определение таких количественных характеристик современных движений, которые были бы, во-первых, однозначными функциями участков коры и, во-вторых, свободны от эффектов, вносимых по крайней мере собственным движением начала координат [3]. Такие параметры можно определить с помощью построения кусочно-линейной картины деформаций приповерхностной части земной коры [1—4].

На основе такой модели между радиусами-векторами пунктов триангуляции $\bar{R}(x; y)$ и векторами их смещений $\bar{r}(u; v)$ можно записать систему линейных уравнений следующего вида:

$$U_i = e_{11}x_i + e_{12}y_i + a, \quad v_i = e_{21}x_i + e_{22}y_i + b \quad (i=1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

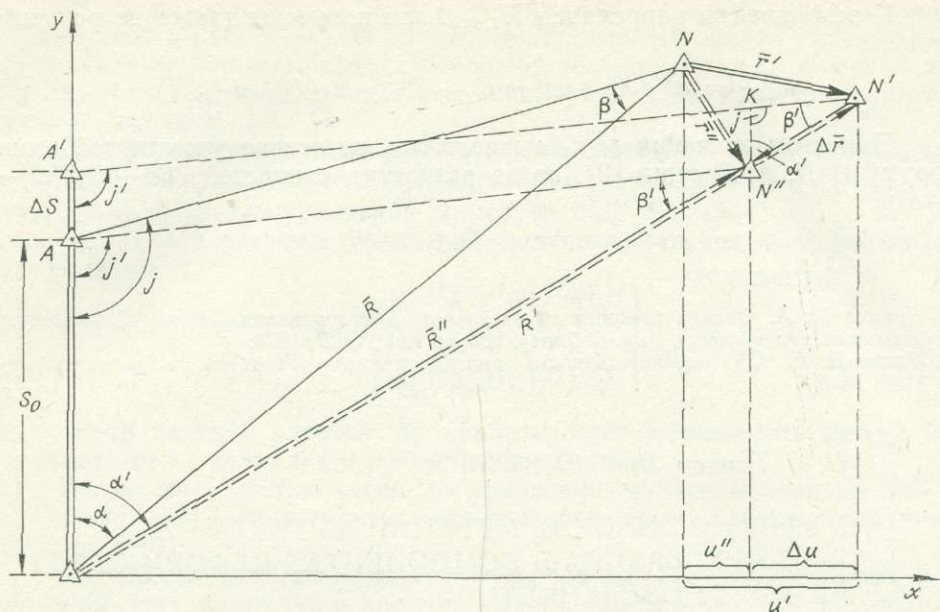


Рис. 1. Определение эффекта приращения длины базиса в компонентах деформации: OA — исходная длина базиса; ΔS — его приращение за период между наблюдениями; N — истинное положение пункта в начальную эпоху наблюдений; N' — истинное положение пункта в повторную эпоху наблюдений; N'' — положение пункта, рассчитанное во вторую эпоху с ошибочной длиной базиса.

из решения которой и определяются компоненты чистой деформации и вращения [1].

Известно, что векторы смещений пунктов триангуляции существенно зависят от точности исходных данных. В связи с этим возникает вопрос, каково влияние ошибок исходных данных на компоненты деформации.

Пусть имеется сеть триангуляции, построенная для изучения современных движений земной поверхности. Примем за начало ортогональной системы координат один из базисных пунктов, а ось y направим вдоль базиса (рис. 1). Будем считать, что углы треугольников измеряются безошибочно в каждую эпоху наблюдений. Если, кроме того, в каждую эпоху наблюдений измерить точно азимут и длину базиса, то очевидно, что будут получены безошибочные векторы тектонических смещений пунктов в принятой системе координат [5].

Предположим, что в период между повторными наблюдениями углов триангуляции азимут и длина базиса остаются неизменными. В общем случае это, конечно, не соответствует действительности, а изменение азимута и длины базиса приведет к ошибкам компонент векторов смещений в каждой точке.

Рассмотрим вначале влияние неучета изменений длины базиса на компоненты деформации.

Пусть в начальную эпоху наблюдений t_0 длина базиса была S_0 , а в результате тектонических движений за период между двумя наблюдениями триангуляции она изменилась на величину ΔS (см. рис. 1). Обозначим радиус-вектор N-го пункта в начальную эпоху наблюдений через $\bar{R}(x_0, y_0)$. Если после тектонических смещений пункта его радиус-вектор $\bar{R}'(x_0+u; y_0+v)$ определен с учетом изменения базиса на ΔS , т. е. безошибочно, то тектонический вектор смещения $\bar{r}'(u', v')$ будет равен

$$\bar{r}' = \bar{R}' - \bar{R}. \quad (2)$$

Если повторно базис не измерялся, то новое положение пунктов будет рассчитано с его первоначальным значением S_0 , и новый радиус-

вектор пункта $\bar{R}''(x_0+u''; y_0+v'')$ будет равен

$$\bar{R}'' = \bar{R} + \bar{r}'', \quad (3)$$

где $\bar{r}''$ — суммарный вектор смещения пункта, включающий тектоническую составляющую движений $\bar{r}'$ и ошибочную компоненту $\Delta\bar{r}$, обусловленную неучетом изменения длины базиса,

$$\bar{r}'' = \bar{r}' + \Delta\bar{r}. \quad (4)$$

В проекциях векторов на оси координат можно записать

$$u' = u'' - \Delta u; v' = v'' - \Delta v. \quad (5)$$

Поскольку

$$\Delta u = \Delta r \cdot \sin \alpha', \text{ а } \Delta r = \Delta S \frac{\sin J'}{\sin \beta'}, \quad (6)$$

то очевидно, что

$$\Delta u = \Delta S \frac{\sin J'}{\sin \beta'} \cdot \sin \alpha'. \quad (7)$$

Учитывая, что

$$R'' = S_0 \frac{\sin J'}{\sin \beta'}, \text{ а } x_{N''} = R'' \cdot \sin \alpha', \quad (8)$$

после преобразования формулы (7) получим

$$\Delta u = \frac{\Delta S}{S_0} x_{N''}. \quad (9)$$

Аналогично будем иметь

$$\Delta v = \frac{\Delta S}{S_0} y_{N''}. \quad (10)$$

Из формулы (9) и (10) видно, что если в повторную эпоху угловых измерений при расчете координат не учитывается изменение длины базиса, то в компонентах векторов смещений возникает ошибка в виде линейной функции положения пункта, которая увеличивается с удалением пункта от начала координат. Об этом неоднократно напоминал в своих работах А. А. Изотов [5].

Из систем уравнений вида (1) определяются следующие компоненты деформации отдельных участков земной поверхности: дилатация ρ , максимальный сдвиг J_m , величина максимального и минимального расширения E_1 и E_2 , направление оси максимального расширения φ и вращение участков как абсолютно твердых тел ω [2]. Поскольку E_1 , E_2 и φ вычисляются через остальные компоненты, то остановимся на влиянии приращения базиса только на дилатацию, сдвиг и вращение, определяемые из следующих соотношений [1]:

$$\rho = e_{11} + e_{22}; J_m = (J_1^2 + J_2^2)^{1/2}; J_1 = e_{11} - e_{22}; \quad (11)$$

$$J_2 = e_{12} + e_{21}; \omega = \frac{1}{2} \left(\frac{e_{12} - e_{21}}{2} \right),$$

где
$$e_{11} = \frac{\partial u}{\partial x}; e_{12} = \frac{\partial u}{\partial y}; e_{21} = \frac{\partial v}{\partial x}; e_{22} = \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Дифференцируя формулы (5) и принимая во внимание (9) и (10), получим

$$\rho' = \rho'' \pm 2 \frac{\Delta S}{S_0}; J_m' = J_m''; \omega' = \omega'', \quad (12)$$

где ρ' , J_m' , ω' — компоненты деформации и вращения, определенные с учетом изменения базиса, а ρ'' , J_m'' , ω'' — их значения, полученные без учета этого изменения.

Таким образом, неучет приращения длины базиса приводит самое большее к постоянной ошибке в рассчитанных значениях дилатации,

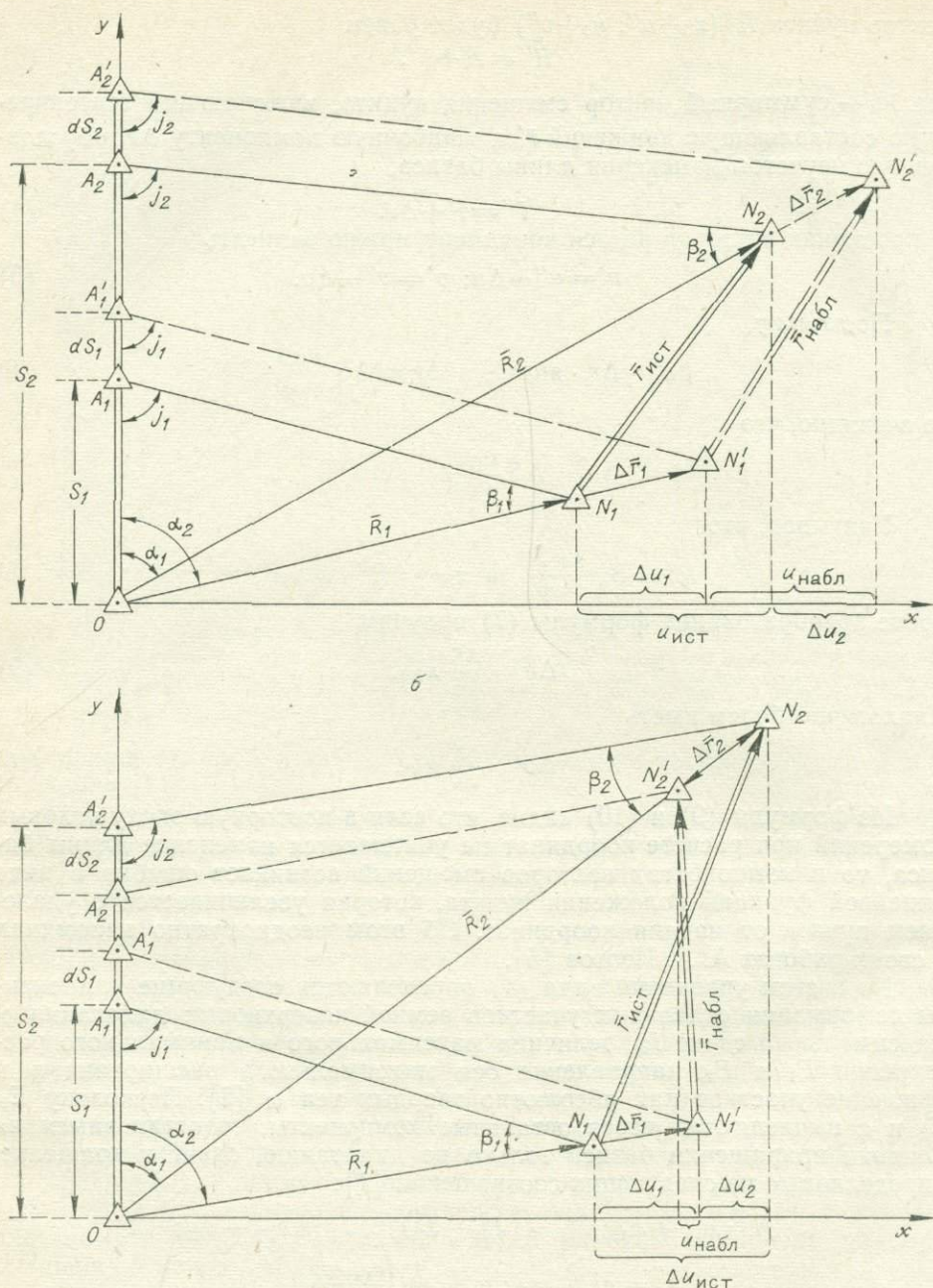


Рис. 2. Определение эффекта ошибок измерения базиса в компонентах деформации.

сдвиговая же компонента деформации и вращение, как видно, совсем не затрагиваются этим эффектом.

Рассмотрим теперь случай, когда базис измеряется в каждую эпоху наблюдений. Пусть S_1 и S_2 — истинная длина базиса, а dS_1 и dS_2 — ее ошибки измерения в начальную и повторную эпохи наблюдений соответственно. Будем вновь считать, что углы треугольников и азимут определяются безошибочно в обе эпохи. Пусть точки N_1 и N_2 являются истинным положением пункта в начальную и повторную эпохи, а N'_1 и N'_2 — их ошибочные положения (рис. 2).

Очевидно, что из-за ошибок измерения базиса вместо истинного вектора смещения $\vec{F}_{ист}$ будет получен вектор смещения $\vec{F}_{набл}$, включаю-

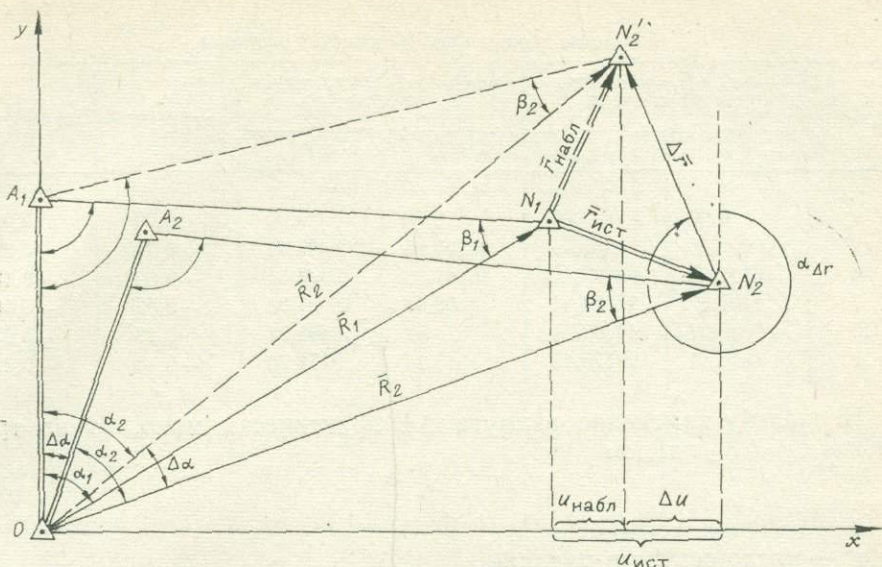


Рис. 3. Определение эффекта изменения азимута в компонентах деформации.

щий в себя истинный вектор смещения и ошибочные компоненты $\Delta \bar{r}_1$ и $\Delta \bar{r}_2$.

Из рис. 2, независимо от комбинации ошибок базиса в начальную и повторную эпохи, следует

$$\bar{r}_{\text{набл}} = \bar{r}_{\text{ист}} + \Delta \bar{r}_2 - \Delta \bar{r}_1, \quad (13)$$

или в проекциях векторов на ось x (каждое слагаемое имеет свой знак, определяемый направлением осей координат)

$$u_{\text{набл}} = u_{\text{ист}} + \Delta u_2 - \Delta u_1. \quad (14)$$

Используя выражения (6) — (8) для проекций ошибочных векторов на ось x , найдем

$$\Delta u_1 = \frac{dS_1}{S_1} x_{N_1}; \quad \Delta u_2 = \frac{dS_2}{S_2} x_{N_2}. \quad (15)$$

Таким образом, ошибки измерения базиса, как и неучет изменения его длины между повторными наблюдениями, обуславливают ошибку в проекциях векторов смещения в виде линейной функции положения пункта. Стало быть эффект этой ошибки в дилатации будет постоянным независимо от положения пунктов и не будет превышать удвоенной суммы относительных ошибок измерения базиса. При равноточных измерениях базиса в начальную и повторную эпохи постоянный эффект в дилатации не будет превышать четырех значений его относительной ошибки. Сдвиг и вращение, как и в первом случае, не зависят от ошибок измерения базиса.

Перейдем к рассмотрению эффекта изменения азимута в компонентах деформации. Пусть на рис. 3 N_1 — истинное положение пункта в первую, а N_2 — во вторую эпохи наблюдений. Примем вновь, что углы измеряются безошибочно, а длина базиса не изменяется. Тогда, если во вторую эпоху координаты пункта определены без учета изменения азимута на угол $\Delta \alpha$, то он займет положение N'_2 (см. рис. 3). Значит

$$\bar{r}_{\text{набл}} = \bar{r}_{\text{ист}} + \Delta \bar{r}, \quad (16)$$

а в проекциях на оси координат можно записать

$$u_{\text{набл}} = u_{\text{ист}} + \Delta u, \quad v_{\text{набл}} = v_{\text{ист}} + \Delta v. \quad (17)$$

Истинные координаты и смещения пунктов

Пункт	Эпоха I $S_1=18036,905\text{м}$ $\alpha_1=27^\circ 03'40'', 137$		Эпоха II $S_2=18037, 137\text{м}$ $\alpha_2=27^\circ 03'35'', 053$		$u_{\text{ист}}=x^{\text{II}}-x^{\text{I}}$	$v_{\text{ист}}=y^{\text{II}}-y^{\text{I}}$
	$X^{\text{I}},\text{м}$	$Y^{\text{I}},\text{м}$	$X^{\text{II}},\text{м}$	$Y^{\text{II}},\text{м}$		
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	16062,25	8205,73	16062,66	8205,44	+0,41	-0,29
6	16141,09	22499,43	16141,00	22499,31	-0,09	-0,12
7	4403,07	15024,41	4403,04	15024,35	-0,03	-0,06
10	-6575,07	14603,99	-6574,94	14603,94	+0,13	-0,05
11	4645,44	29175,15	4645,34	29174,93	-0,10	-0,22

Поскольку изменение азимута $\Delta\alpha$ практически мало, то из треугольника N_1ON_2 найдем

$$\Delta r = R \cdot \frac{\Delta\alpha}{\rho^*}, \quad (18)$$

где ρ^* — число секунд в радиане.

Проекции вектора $\overline{\Delta r}(\Delta u; \Delta v)$ на оси координат будут равны:

$$\Delta u = \Delta r \cdot \sin \alpha_{\Delta r}, \quad \Delta v = \Delta r \cdot \cos \alpha_{\Delta r}, \quad (19)$$

где $\alpha_{\Delta r}$ — дирекционный угол вектора $\overline{\Delta r}$, отсчитанный по часовой стрелке от вертикальной оси принятой системы координат. Подставляя (18) в (19) и учитывая, что

$$\alpha_{\Delta r} = \alpha_R + 3/2 \cdot \pi; \quad R \cdot \cos \alpha_R = y; \quad R \cdot \sin \alpha_R = x,$$

получим

$$\Delta u = -\frac{\Delta\alpha}{\rho^*} y; \quad \Delta v = +\frac{\Delta\alpha}{\rho^*} x. \quad (20)$$

Так как $\overline{\Delta r}$ всегда перпендикулярен $\overline{R}$, то в общем случае

$$\alpha_{\Delta r} = \alpha_R \pm \left(\frac{\pi}{2} + n\pi \right), \quad (n = 0 \text{ или } 1)$$

и, стало быть, знаки проекций вектора $\overline{\Delta r}$ на оси x и y будут всегда противоположными.

Аналогично можно показать, что и ошибки собственно измерения азимута в I и II эпохи наблюдений обусловят собой ошибки в проекциях векторов смещений в виде линейных функций положения пунктов.

Таким образом, самое большее, что могут вызвать ошибки азимута исходной стороны в компонентах деформации, — это постоянный эффект. Действительно, дифференцируя выражение (17) с учетом (11) и (20), найдем

$$\rho' = \rho''; \quad J'_m = J''_m; \quad \omega' = \omega'' \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\rho^*},$$

Таблица 2

Координаты и смещения пунктов, полученные в эпоху II без повторного измерения базиса (1) и азимута (2)

Пункт	$S_1=18036,905\text{м}$ $\alpha_1=27^\circ 03'35'', 053$		$\alpha_1=27^\circ 03'40'', 137$ $S_2=18037, 13\text{м}$		$u_1=x^{\text{II}}-x^{\text{I}},\text{м}$	$v_1=y^{\text{II}}-y^{\text{I}},\text{м}$	$u_2=x^{\text{II}}-x^{\text{I}},\text{м}$	$v_2=y^{\text{II}}-y^{\text{I}},\text{м}$
	$x^{\text{II}},\text{м}$	$y^{\text{II}},\text{м}$	$X^{\text{II}},\text{м}$	$Y^{\text{II}},\text{м}$				
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	16062,45	8205,34	16062,46	8205,84	+0,20	-0,39	+0,21	+0,11
6	16140,79	22499,02	16140,45	22499,71	-0,30	-0,41	-0,64	+0,28
7	4402,98	15024,16	4402,67	15024,46	-0,09	-0,25	-0,40	+0,05
10	-6574,86	14603,75	-6575,30	14603,78	+0,21	-0,24	-0,23	-0,21
11	4645,28	29174,56	4644,62	29175,05	-0,16	-0,59	-0,82	-0,10

Таблица 3

Эффект изменения азимута и длины базиса в компонентах деформации в 10^{-6}

Компоненты деформации	Участки					
	2, 7, 10	2, 6, 7, 11	2, 7, 10	2, 6, 7, 11	2, 7, 10	2, 6, 7, 11
	Истинные деформации с учетом изменения азимута и базиса		Деформации при неучтенном изменении базиса		Деформации при неучтенном изменении азимута	
ρ	+5	+4	-8	-9	+5	+4
J_m	+21	+27	+21	+27	+21	+27
E_1	+16	+18	+3	+5	+16	+18
E_2	-5	-9	-18	-22	-5	-9
$\varphi(\text{рад})$	-0,5	-1,3	-0,5	-1,3	-0,5	-1,3
ω''	+0,8	-0,8	+0,8	-0,8	-1,8	-3,3

где ρ'' ; J_m'' ; ω'' — дилатация, сдвиг и вращение, соответственно определенные без учета изменения азимута, а ρ' ; J_m' ; ω' — их истинные значения.

Используя пример моделирования горизонтальных движений земной поверхности из работы [5], мы рассчитали истинные компоненты деформации, т. е. с учетом изменения азимута и длины базиса во вторую эпоху наблюдений участков 2, 7, 10-го и 2, 6, 7, 11-го (рис. 4). Затем были определены компоненты без учета изменения базиса и, наконец, они же рассчитаны без учета изменения азимута во вторую эпоху наблюдений. Результаты и исходные данные приведены в табл. 1—3.

Выполненный анализ и данные табл. 3 показывают, что сдвиговая компонента деформации (J_m) и направление главных осей растяжений — сжатия (φ) совсем не затрагиваются изменением длины базиса и азимута. Это отражает зависимость J_m и φ только от изменений углов в треугольниках. Дилатация (ρ) и значения максимального и минимального растяжений (E_1 и E_2) несут в себе постоянную ошибку от изменения базиса, а вращение (ω) — от изменения азимута.

Таким образом, кроме новой информации о процессе современных движений земной коры компоненты деформации обладают свойством отделять эффекты ошибок угловых и линейных измерений более четко, чем векторы смещений. Постоянство ошибок в компонентах деформации от того или иного исходного элемента на всех участках рассматриваемой геодезической сети позволяет экономичнее выполнять исследования современных движений земной коры геодезическими методами, а при необходимости и ограничиваться приближенным значением масштаба и ориентировки сети без существенной потери информации о характере процесса деформирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Есиков Н. П. Тензорное поле деформаций земной коры и методика его изучения по данным геодезических измерений. — «Геол. и геофиз.», 1973, № 7.
2. Есиков Н. П. Кусочно-линейное аппроксимирование деформаций земной коры. — В кн.: Методические вопросы исследования современных движений земной коры. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975.
3. Есиков Н. П., Кесельман С. И. Об инвариантах современных движений земной коры. — «Геол. и геофиз.», 1975, № 4.

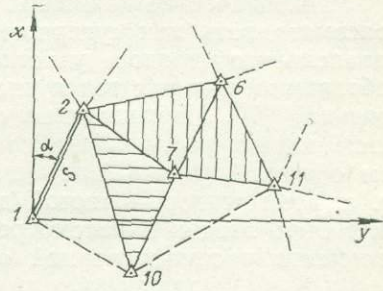


Рис. 4. Схема триангуляции (участок взят из работы [5]).

4. Есиков Н. П., Кесельман С. И. Дилатация приповерхностной части земной коры на некоторых геодинамических полигонах.— В кн.: Методические вопросы исследования современных движений земной коры. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975.
5. Изотов А. А. Опыт моделирования горизонтальных движений земной коры.— В кн.: Проблемы современных движений земной коры (Третий Междунар. симпозиум. Л., 1968 г.). М., 1969.

Н. П. Есиков

ОБ ИЗУЧЕНИИ ИНВАРИАНТОВ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Традиционное описание современных движений только векторными схемами смещений относительно исходного пункта дает слабое представление о явлении чистого деформирования коры. Очевидно, что можно построить столько подобных схем, особенно для горизонтальной составляющей движений, сколько дискретных точек было включено в систему определения относительных перемещений в любой рассматриваемой области, поскольку каждая такая точка может быть началом координат. Стало быть величина, знак и направление относительной скорости перемещения дают только частную информацию о движениях.

Тектонические движения земной коры с полным основанием можно рассматривать как суперпозицию трех основных видов движения: параллельного переноса участков коры, их вращательного движения как абсолютно твердых тел и чистой деформации (теорема Коши — Гельмгольца) [7]. Последняя из составляющих, как известно, характеризуется двумя независимыми компонентами — относительным изменением объема или площади (дилатация) и искажением формы (сдвиг), т. е. всем тензором чистой деформации, который в нашем случае может быть введен в рассмотрение путем сравнения состояния конечного элемента рассматриваемой области в данный момент времени с его состоянием в какой-либо другой момент принятый за начальный [7].

Техническим аппаратом для определения компонент чистой деформации и вращения может служить метод конечных элементов [6, 8], сущность которого в приложении к анализу тектонических движений состоит в том, что исследуемая область земной коры или ее поверхности разбивается на ряд подобластей, в каждой из которых искомое поле деформаций предполагается однородным. Последнее позволяет для каждой такой подобласти составить свою систему линейных уравнений связывающих составляющие радиусов-векторов точек данной подобласти $\bar{R}(x, y, z)$ и векторов их перемещений $\bar{r}(u, v, w)$ [1—3].

Решение подобных систем уравнений позволяет выделить тензор чистой деформации и кососимметричный тензор, из которых затем по известным правилам находятся значения сдвиговых деформаций, дилатации, вращения, устанавливаются величины главных деформаций и направления их осей в каждой локальной подобласти [2—4].

При анализе только вертикальной составляющей движений, в частности, по данным повторных нивелировок вдоль отдельных линий можно рассматривать чистую деформацию вертикального разреза верхней части земной коры.

Прежде чем рассмотреть методику определения подобных характеристик, сделаем несколько замечаний. При изучении чистой деформации важен выбор масштаба конечных элементов, для которых можно считать вполне вероятной однородную деформацию. Дело в том, что для описания тектонических деформаций земной коры крупного региона нельзя брать конечные элементы размером, например, в несколько

сантиметров или даже метров, так как они не будут представительными для областей порядка сотен метров или километров. Регион может состоять из разделенных разломами блоков и других неоднородностей. Если пытаться определять крупномасштабные аномалии деформаций региона, т. е. низкочастотную часть общего пространственного деформирования региона, то ясно, что в качестве конечного элемента надо брать участки, которые содержали бы достаточное число неоднородностей, чтобы форма и размеры этого элемента несущественно влияли на определение компонент деформации.

Очевидно, что региональные аномалии деформаций будут существенно отличаться от тех деформаций, которые можно получить, если выбирать конечные элементы размером в несколько метров или несколько десятков сантиметров. Таким образом, по отношению к региональным тектоническим деформациям можно рассматривать много локальных деформаций мелкого масштаба, обусловленных, в частности, неоднородностью строения и состава верхних горизонтов земной коры. Поэтому, например, наклономерные наблюдения характеризуют участки незначительных размеров и судить по ним о тектонических деформациях масштаба в несколько километров нельзя. Результаты исследований с помощью деформографов на базе 25—30 м могут описывать деформации более крупного масштаба, и только геодезические измерения, выполняемые на значительно больших базах, можно использовать для характеристики аномалий деформирования коры регионального плана.

При анализе современных движений земной коры исследуемую область целесообразно разбивать на треугольные конечные элементы. Это обусловлено как самими геодезическими методами наблюдений (триангуляция, трилатерация), так и тем обстоятельством, что если в пределах треугольного элемента перемещения задаются в виде линейных функций координат, то совмещение вершин двух соседних элементов обеспечивает совместность перемещений на их общей границе [8].

В работе [5] излагалась методика определения компонент чистой деформации вертикального разреза по данным о современных вертикальных перемещениях поверхности вдоль профиля нивелирования. Однако элементы, для которых вычислялись компоненты деформации, могут значительно различаться по форме и площади в зависимости от рельефа местности и от расстояния между реперами. Поэтому для сравнительного анализа пространственного характера и интенсивности деформаций необходимо каким-либо образом конечные элементы стандартизовать по величине и форме. Один из путей подобной стандартизации — это сопоставление каждого репера, скорость которого определена, с прямоугольным равнобедренным треугольником с основанием параллельным оси x . Рассмотрим определение компонентов чистой деформации такого элемента.

Предположим, что каждый репер нивелирного хода является вершиной упомянутого треугольника, расположенного в плоскости вертикального разреза (плоскость деформации), у которого расстояние между точками основания равно $2h$, а высота — h . Полагая, что на глубине h метров по отвесной линии величина смещения точек такая же, как и в соответствующих им точках поверхности, будем определять величину перемещения вершин основания треугольника линейным интерполированием.

Пусть вершина треугольника (рис. 1) соответствует k -му от начала координат реперу. Тогда вершины стандартного треугольника будут иметь следующие координаты:

$$A(x_k - h; z_k - h); B(x_k; z_k), C(x_k + h; z_k - h),$$

где x_k, z_k — координаты k -го репера.

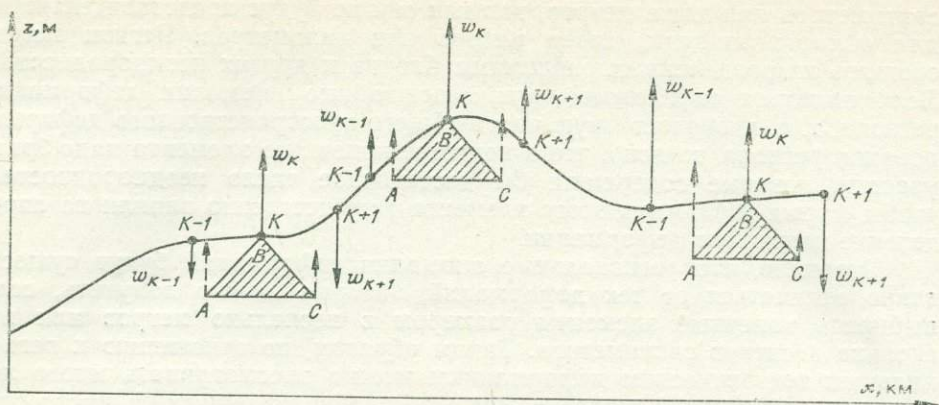


Рис. 1. Схема определения компонент чистой деформации вертикального разреза земной коры по прямолинейному профилю.

Если w_A , w_K , w_C — смещения вершин стандартного треугольника, то его дилатация найдется из следующего выражения [5]:

$$\theta = \frac{w_A - 2w_K + w_C}{-2h}, \quad (1)$$

где $w_A = w_K - \Delta w_A$; $w_C = w_K + \Delta w_C$, а

$$\Delta w_A = \frac{w_K - w_{K-1}}{x_K - x_{K-1}} \cdot h; \quad \Delta w_C = \frac{w_{K+1} - w_K}{x_{K+1} - x_K} \cdot h, \quad (2)$$

где, в свою очередь, w_{K+1} ; w_{K-1} ; x_{K+1} ; x_{K-1} — смещения и координаты последующего и предыдущего относительно k -го реперов соответственно.

Используя формулы (1) и (2), после простых преобразований получим

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{w_K - w_{K-1}}{x_K - x_{K-1}} - \frac{w_{K+1} - w_K}{x_{K+1} - x_K} \right), \quad (3)$$

где $\Delta x_{K, K-1} = x_K - x_{K-1}$; $\Delta x_{K+1, K} = x_{K+1} - x_K$.

Сдвиговая компонента деформации для любого треугольного элемента может быть получена по следующей формуле [5]:

$$J = \frac{w_A(z_K - z_C) + w_K(z_C - z_A) + w_C(z_A - z_K)}{x_A(z_K - z_C) + x_K(z_C - z_A) + x_C(z_A - z_K)}. \quad (4)$$

Подставляя в (4) координаты вершин треугольника ABC и учитывая, что $z_C = z_A$, найдем

$$J = \frac{w_A - w_C}{-2h}. \quad (5)$$

Преобразовывая формулу (5) с учетом (2), получим

$$J = \frac{1}{2} \left(\frac{w_K - w_{K-1}}{\Delta x_{K, K-1}} + \frac{w_{K+1} - w_K}{\Delta x_{K+1, K}} \right). \quad (6)$$

Таким образом, сдвиговая компонента деформации стандартного треугольного элемента вертикального разреза земной коры и его дилатация весьма просто определяются по смещениям (или скоростям) трех смежных реперов, расположенных на прямолинейном профиле.

Остановимся теперь кратко на соотношении чистой деформации с широко используемым при различного рода тектонических построениях градиентом вертикальных движений в горизонтальном направлении.

Его величина, как известно, определяется по следующей формуле:

$$|\text{grad } w| = \frac{|w_2 - w_1|}{l}, \quad (7)$$

где w_2 и w_1 — скорости смещений поверхности в двух точках, отстоящих друг от друга на расстоянии l (направление l должно быть ортогональным изолиниям скорости).

Основной недостаток подобной характеристики тектонических движений состоит в том, что она не может быть использована для выделения типов деформации земной коры, знание которых как раз и важно при решении вопросов тектонофизики, в частности, при выделении зон однородного деформирования при сейсмическом районировании и др.

Рассмотрим, какие должны быть эпюры скорости движений на участке поверхности между $K+1$ и $K-1$ реперами профиля, при которых сдвиг равнялся бы нулю в окрестности промежуточной K -й точки, полагая, что между крайними и промежуточной точками скорость распределена линейно (рис. 2, а). В этом случае, очевидно, должно выполняться следующее соотношение:

$$\frac{w_{K-1} - w_K}{w_{K+1} - w_K} = \frac{x_K - x_{K-1}}{x_{K+1} - x_K} = T_\gamma, \quad (8)$$

являющееся уравнением семейства эпюр. Полагая, что $T_\gamma = 1, 2, 1/2$, на рис. 2, а построены некоторые эпюры, удовлетворяющие (8). Подобных распределений можно построить бесконечно много в зависимости от величины критерия T_γ и сочетаний скорости в трех заданных точках.

Из рисунка видно, что как бы ни определялся модуль градиента скорости перемещений по формуле (7), он отнюдь не будет соответствовать сдвиговой деформации в окрестности K -й точки.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда деформация растяжения — сжатия (изгиб) равна нулю. Тогда уравнением эпюр скорости будет соотношение

$$\frac{w_K - w_{K-1}}{w_{K+1} - w_K} = \frac{x_K - x_{K-1}}{x_{K+1} - x_K} = T_0. \quad (9)$$

Легко убедиться, что при выполнении равенства (9) площадь стандартного треугольника вертикального разреза не изменится (см. рис. 2, б). При таких эпюрах скорости между точками $K-1$ и $K+1$ градиент вертикальных смещений по поверхности будет равен сдвиговой деформации в окрестности точки K .

В общем случае распределения скоростей вертикальных перемещений могут и не удовлетворять условиям (8) и (9), тогда в окрестности точки K будут одновременно наблюдаться оба типа деформирования вертикального разреза.

Из сказанного ясно, что градиент современных или новейших вертикальных движений не может вскрыть тип деформации земной коры. При одних эпюрах скорости на поверхности он может быть пропорционален относительноному изменению площади вертикального разреза — дилатации (см. рис. 2, а), при других — равен сдвиговой компоненте деформации (см. рис. 2, б), а в общем случае его величина может быть обусловлена обоими типами деформирования. При этом одинаковым значениям модуля градиента могут соответствовать различные сочетания значений сдвига и дилатации. Поэтому величина градиента вертикальных тектонических движений, одинаковая для различных районов, еще не означает, что подобные районы являются однородными зонами деформации и, например, одинаково опасны в сейсмическом отношении.

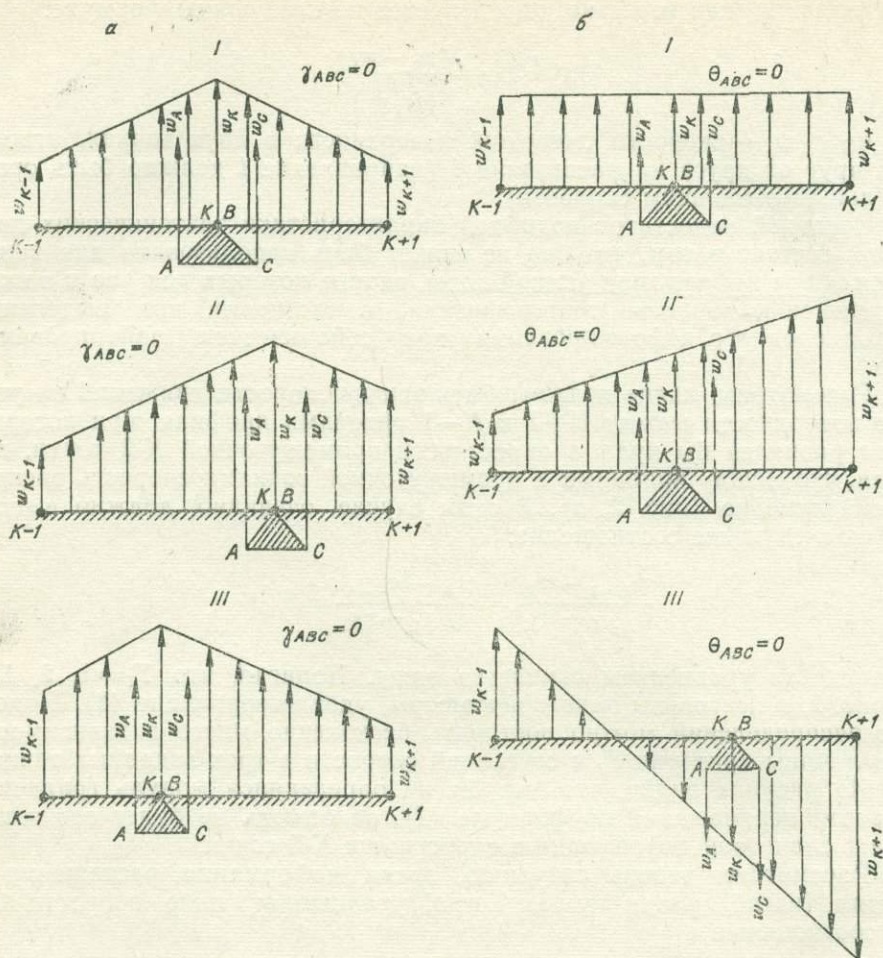


Рис. 2. Простейшие эпюры скорости вертикальных движений, при которых в окрестности промежуточной точки сдвиг (а) и дилатация (б) равны нулю.

Таким образом, при решении вопросов сейсмического районирования, поисках предвестников землетрясений, выделения структурных особенностей верхней части земной коры необходим дифференцированный анализ информации о современных и новейших движениях земной коры с обязательным учетом инвариантности изучаемых величин относительно начала координат. Только на основе подобных количественных характеристик могут быть познаны объективные закономерности, присущие изучаемому явлению. Отвечают этому требованию рассмотренные выше параметры вертикальных движений — сдвиговая компонента деформации и изгиба вертикального разреза верхней части земной коры. Эти величины, являясь инвариантными относительно начала координат, позволяют глубже и всесторонне описать кинематику вертикальных движений, выявить относительную роль основных типов деформирования в том или ином районе и, стало быть, более обоснованно относить различные участки поверхности к квазигоднородным зонам деформирования. Вместе с тем анализ их развития во времени принесет новую информацию для решения вопросов, связанных с поиском предвестников землетрясений, а изучение распределения локальных аномалий в пространстве поможет изучению строения и состава верхней части земной коры.

Простота математического аппарата метода конечных элементов и физическая наглядность определяемых величин должна помочь полнее использовать современные движения в решении многих вопросов тектонофизики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акивис М. А., Гольдберг В. В. Тензорное исчисление. М., «Наука», 1969.
2. Есиков Н. П. Тензорное поле деформаций земной коры и методика его изучения по данным геодезических измерений.— «Геол. и геофиз.», 1973, № 7.
3. Есиков Н. П. Кусочно-линейное аппроксимирование деформаций земной коры.— В кн.: Методические вопросы исследования современных движений земной коры. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975.
4. Есиков Н. П., Кесельман С. И. Инварианты современных движений земной коры.— «Геол. и геофиз.», 1975, № 4.
5. Есиков Н. П., Кесельман С. И. Дилатация приповерхностной части земной коры на некоторых геодинамических полигонах.— В кн.: Методические вопросы исследования современных движений коры. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов: от интуиции к общности.— «Механика», 1970, № 6.
7. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. I. М., «Наука», 1973.
8. Тимошенко С. П., Гудвер Дж. Теория упругости. М., «Наука», 1975.

СОДЕРЖАНИЕ

Региональные полигоны

- ✓ Ю. Д. Буланже, А. К. Певнев. О состоянии и перспективах исследований современных движений земной коры на геодинамических полигонах СССР 4

Сибирь и Дальний Восток

- Э. Э. Фотиади. Состояние, результаты и перспективы исследований современных движений земной коры на Байкальском геодинамическом полигоне 8
- В. Г. Колмогоров. Систематические геодезические наблюдения за современными движениями земной коры в Байкальской рифтовой зоне 13
- П. П. Колмогорова. Закономерности распределения современных вертикальных движений земной коры в Байкальской рифтовой зоне 21
- ✓ Л. М. Кнуренко. Карта современных движений земной коры Кузбасса 30
- В. К. Захаров, В. П. Семакин, Г. Г. Якушко. Движение земной поверхности на юго-западе Сахалина и Монеронское землетрясение 1971 г. 33
- Н. Ф. Василенко, В. Г. Медведев. О наблюдениях за горизонтальными движениями земной коры на Сахалинском геодинамическом полигоне 40
- (Н. Н. Одинев), Г. В. Сапрыкин. Светодальномерные измерения на о. Шикотан в 1973—1974 гг. 42
- М. А. Магуськин. Смещения земной поверхности в районе Карымского вулкана по измерениям 1972—1974 гг. 45
- В. В. Злотин. Исследование возможности применения и точности электронных методов измерения сторон региональной сети Камчатского геодинамического полигона 50

Средняя Азия

- Н. А. Корешков, В. А. Пискулин, А. П. Райзман. О состоянии и некоторых результатах геодезических работ на геодинамических полигонах Средней Азии 59
- В. С. Передеро, П. А. Остропики, П. А. Атрушкевич. О методике инструментального изучения современных горизонтальных движений в Северном Тянь-Шане на локальных участках полигона 67
- П. А. Остропики, Э. М. Антоненко, П. А. Атрушкевич. Опыт изучения современных движений земной коры в Приалмаатинском сейсмическом районе 74
- В. М. Сигалов. Карта относительных скоростей современных вертикальных движений земной коры Северного Тянь-Шаня 81
- ✓ А. К. Певнев, Т. В. Гусева, Н. Н. Одинев, Г. В. Сапрыкин. Закономерности деформаций земной коры в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня 86
- Л. А. Латынина, Т. В. Гусева, Н. А. Жаринов, Р. М. Кармалеева, О. Д. Никифорова, А. К. Певнев, А. А. Хоботько. О движениях, регистрируемых в зоне Сурхобского разлома на станции Сары-Пуль 92
- М. К. Курбанов, В. И. Лыков, С. С. Челпанов. Вертикальные движения реперов в зоне очагов Ашхабадских землетрясений 100
- В. И. Лыков, А. И. Старченко, Э. Л. Шиханович. Горизонтальные колебательные движения реперов в зоне очагов Ашхабадских землетрясений 104
- Н. С. Благоволин, С. К. Горелов, Г. Н. Пшенин, В. А. Филькин, Е. А. Финько. О соотношении эндогенных и экзогенных процессов на геодинамических полигонах 108
- ✓ А. А. Никонов. Горизонтальные движения по разломам Средней Азии и вопросы оценки сейсмической опасности 114

Европейская часть СССР

- ✓ В. С. Вереда, Ф. М. Урманцев, С. К. Юрченко, В. Г. Суровцев, В. Г. Саенко, Ф. И. Динь. Десять лет исследований современных движений земной коры в Донецком бассейне 123
- В. И. Сомов, И. Ш. Рахимова. Результаты и перспективы изучения пространственно-временных изменений скорости современных вертикальных движений земной коры в Карпатах 126
- В. Г. Кузнецова. Связь современных вертикальных движений земной коры с геофизическими полями и глубинной структурой Карпат 132
- Х. Х. Сальдвээ, А. А. Мийдел. Некоторые результаты интерпретации современных движений земной коры в Эстонии 138
- А. А. Торим. О развешивании работ по изучению горизонтальных движений земной поверхности в ЭССР 143
- В. М. Яковлев, М. Т. Козлов, Г. Д. Панасенко. О природе вертикальных движений земной поверхности на отрезке Апатиты—Титан линии повторного нивелирования Кольского геодинамического полигона 146

Общие вопросы

- Я. В. Наумов. Геодезические работы по изучению движений земной коры в районах строительства высоких плотин 152
- ✓ А. Ш. Файтельсон, Н. Т. Миронов, М. И. Юркина. Медленные изменения гравитационного поля Земли и современные движения земной коры 154
- ✓ А. Т. Донабедов, В. А. Сидоров, В. А. Филькин. Современные вертикальные движения земной поверхности в нефтегазоносных областях (постановка задачи и результаты исследований на Грозненском и Речицком полигонах) 162
- ✓ И. Н. Мецкерский. О точности нивелирования 1-го класса в горных районах 169
- ✓ С. В. Энман. Исследования систематических ошибок и оценка точности прецизионного нивелирования в горных районах 171
- Н. В. Яковлев. Учет динамики визирного луча при высокоточных угловых измерениях и азимутальных определениях 178
- Н. Н. Одинов. Опыт светодальномерных измерений повышенной точности в горных районах 184
- Ю. А. Крюков. Возможности решения задач изучения современных движений земной коры в автоматизированной системе обработки, хранения и выдачи результатов нивелирования 187
- Т. П. Корокина. Возможность совместного использования океанографических данных и данных геометрического нивелирования для определения высот реперов морских уровневых пунктов 189
- В. К. Панкрушин, С. С. Челпанов, А. П. Кириенко. Оценка точности геометрического нивелирования и вертикальных смещений земной поверхности с учетом корреляции ошибок измерений 193
- Н. П. Есиков, В. С. Юдин. Эффект ошибок измерений азимута и длины базиса в компонентах деформации земной поверхности 195
- Н. П. Есиков. Об изучении инвариантов современных движений земной коры 202

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

(исследования на геодинамических полигонах)

Ответственный редактор

Эпоминонд Эпоминонович Фотиади

Редактор издательства Е. Г. Макеенко

Художественный редактор М. Ф. Глазырина

Художник Е. Ф. Новиков

Технический редактор Г. Я. Герасимчук

Корректоры А. А. Надточий, К. И. Сергеева

ИБ № 9859

Сдано в набор 30 июня 1977 г. Подписано в печать 12 апреля 1978 г. МН 01525. Формат 70×108/16. Бумага типографская № 2. 13,5 печ. л., 18,9 усл. печ. л.+1 вкл., 20 уч.-изд. л. Тираж 1350 экз. Заказ № 599. Цена 3 руб.

Издательство «Наука», Сибирское отделение. 630099, Новосибирск, 99, Советская, 18.
4-я типография издательства «Наука». 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.

О состоянии и перспективах исследований современных движений земной коры на геодинамических полигонах. Ю. Д. Буланже, А. К. Певнев. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 4—7.

Рассматривается вопрос о целесообразности создания суперполигонов для установления региональных закономерностей смещений земной коры.

Ил. 1.

Состояние, результаты и перспективы исследований современных движений земной коры на Байкальском геодинамическом полигоне. Э. Э. Фотиади. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 8—13.

Особенности тектонического развития Байкальской рифтовой зоны предопределили выбор этого района для создания геодинамического полигона. Здесь ведется комплекс геофизических и геодезических исследований: глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ), гравиметрические, магнитометрические, геотермические и геодезические измерения геофизических полей и современных движений земной коры. Получены корреляционные связи современных движений земной поверхности с аномальными полями, глубинным строением, неотектоникой. Предлагается план дальнейших исследований в Байкальской рифтовой зоне.

Систематические геодезические наблюдения за современными движениями земной коры в Байкальской рифтовой зоне. В. Г. Колмогоров. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 13—20.

Геодезические наблюдения за современными движениями земной коры на Байкальском геодинамическом полигоне ведутся ежегодно с 1968 г. на Селенгинском и Ангинском профилях и с 1973 г.— на трех линиях, заложенных на разломах Баргузинской впадины.

Обращает на себя внимание ход изменения высот реперов Селенгинского профиля, в частности малая амплитуда вертикальных движений в юго-восточной части и значительно большая в северо-западной его части (около Байкала). Характер изменения высот реперов во времени коррелируется между собой и имеет закономерный характер.

Ил. 4, библ. 11.

Закономерности распределения современных вертикальных движений земной коры в Байкальской рифтовой зоне. П. П. Колмогорова. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 21—30.

С целью дальнейшего выявления закономерностей распределения современных вертикальных движений в Байкальской рифтовой зоне и прилегающих к ней районов, проанализированы результаты повторного нивелирования линий общей протяженностью около 7 тыс. км. В статье дана оценка результатов повторного нивелирования, проведенного для доказательства достоверности используемых геодезических данных при изучении современных движений земной коры. Дано описание «Карты скоростей современных движений земной коры южного Прибайкалья и Забайкалья».

Ил. 3, табл. 2, библ. 6.

Карта современных движений земной коры Кузбасса. Л. М. Кнуренко. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 30—33.

Для изучения современных вертикальных движений земной коры Кузбасса и прилегающих к нему районов было собрано 2817,3 км линий повторного нивелирования. Обработка материалов выполнена по методике ЦНИИГАиК. Для составления карты скоростей современных вертикальных движений земной коры проведено сгущение сети опорных пунктов по геоморфологическим признакам.

Ил. 1, библ. 8.

Движения земной поверхности на юго-западе Сахалина и Монеронское землетрясение 1971 г. В. К. Захаров, В. П. Семакин, Г. Г. Якушко. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 33—40.

Анализируются результаты мареографических измерений, повторных нивелировок и триангуляции. Выявленные вертикальные и горизонтальные движения связываются авторами с Монеронским землетрясением, произошедшим 5 сентября 1971 г.

Ил. 5, табл. 2, библ. 4.

О наблюдениях за горизонтальными движениями земной коры на Сахалинском геодинамическом полигоне. Н. Ф. Василенко, В. Г. Медведев. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 40—42.

В южной части Центрально-Сахалинского разлома на приуроченных к нему поперечных разломах северо-западного простирания, проходящих по долинам рек, построены две локальные сети линейно-угловой триангуляции для наблюдения за горизонтальными движениями земной коры.

Горизонтальные углы измерялись видоизмененным способом круговых приемов с точностью не ниже 1-го класса: средняя квадратическая ошибка измеренных углов по невязкам треугольников составляет 0,51 для обеих сетей. Измерение линейных элементов выполнено светодальномером СГ-3 с относительной ошибкой $1,5 \cdot 10^{-6} + 0,8 \cdot 10^{-6}$ (для сторон от 2,6 до 4,9 км). Высказываются предложения о повышении точности линейных измерений до $0,5 \cdot 10^{-6}$ и ставятся задачи дальнейших исследований горизонтальных движений на полигоне.

Ил. 2, библи. 3.

УДК 551.24 : 528

Светодальномерные измерения на о. Шикотан в 1973—1974 гг. [Н. Н. Одинев],

Г. В. Сапрыкин. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 42—45.

Остров Шикотан, входящий в Малую Курильскую гряду, разбит сетью разломов на ряд блоков. С целью выявления горизонтальных движений на острове в последние два года проводятся светодальномерные измерения. Изложены особенности постановки светодальномерных измерений в условиях Курил, а также результаты измерений на о. Шикотан. На основе первых повторных измерений сделаны выводы о характере и величинах подвижек за август 1973 — сентябрь 1974 гг.

В результате сравнения результатов измерений двух полевых сезонов выяснено, что взаимное положение точек, расположенных в пределах одного блока, практически не изменилось, а расположенных в разных блоках изменилось на величину порядка 2 см.

Ил. 1, табл. 1.

УДК 551.24 : 528

Смещения земной поверхности в районе Карымского вулкана по измерениям 1972—1974 гг. М. А. Магуськин. Современные движения земной коры. Новосибирск, 1978, с. 45—50.

С целью выявления деформаций земной поверхности в районе Карымского вулкана с 1971 г. проводится комплекс геодезических измерений: нивелирование, линейные и угловые измерения на сетях микротриангуляции. Обнаружены геологические нарушения по трассе нивелирования и горизонтальные сдвиги. Полученные данные могут быть использованы для уточнения механизма деятельности вулкана, его строения и прогноза извержений.

Ил. 3, табл. 1, библи. 3.

УДК 551.24 : 528

Исследование возможности применения и точности электронных методов измерения сторон региональной сети Камчатского геодинамического полигона. В. В. Злотин. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 50—59.

Описываются результаты выполненных в 1972—1973 гг. исследований, позволивших сделать практические рекомендации в отношении оптимальной программы, типов электронных дальномеров и способов учета метеоданных в зависимости от длины линии. При выполнении указанных рекомендаций предельные случайные относительные ошибки окончательных значений дальностей не превысят $1 \cdot 10^{-6}$ при расстояниях до 50 км и $2 \cdot 10^{-6}$ при расстояниях до 150 км.

Ил. 2, табл. 2, библи. 8.

УДК 551.242 : 528.02

О состоянии и некоторых результатах геодезических работ на геодинамических полигонах Средней Азии. Н. А. Корешков, В. А. Пискулин, А. П. Райзман. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 59—67.

Для обнаружения предвестников землетрясений и совершенствования методики сейсмического микрорайонирования в тектонически активных районах Средней Азии и в местах сооружения крупных гидроэлектростанций созданы геодинамические полигоны. Разработаны технические проекты на создание Ашхабадского геодинамического полигона и геодезические измерения в районе Рогунской ГЭС.

Ил. 3, библи. 3.

УДК 551.242

О методике инструментального изучения современных горизонтальных движений в Северном Тянь-Шане на локальных участках полигона. В. С. Передеро, П. А. Остропико, П. А. Атрушкевич. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 67—74.

Для изучения горизонтальных движений в эпицентральной зоне Чиликского (1889 г.) землетрясения создан Алгабасский геодезический полигон.

Геодезическая сеть полигона состоит из 8 тумб и 17 линий и связывает воедино три крупные геологические структуры, расчлененные разломами. Протяженность линий в сети 1500—5500 м и в среднем 2000 м.

С сентября 1973 по май 1975 г. выполнено светодальномером СГ-3 шесть измерений с периодом от одного до шести месяцев.

В статье обсуждаются результаты повторных измерений.

Ил. 2, табл. 2, библи. 3.

Опыт изучения современных движений земной коры в Приалмаатинском сейсмическом районе. П. А. Остропико, Э. М. Антоненко, П. А. Атрушкевич. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 74—81.

Исследование движений земной коры в районе Алма-Аты ведется в течение восьми лет. Данные о деформациях земной коры позволяют говорить об их генетической связи с проявлениями современной сейсмической активности. Делается вывод о циклической природе современных движений земной коры сейсмического района. Сделана попытка объяснить фазы движений земной коры обобщенной теорией упругой отдачи.

Ил. 2, библи. 23.

Карта относительных скоростей современных вертикальных движений земной коры Северного Тянь-Шаня. В. М. Сигалов. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 81—86.

По результатам двукратного нивелирования составлена карта относительных скоростей вертикальных движений земной коры на сейсмоопасную территорию Северного Тянь-Шаня.

Карта базируется на комплексном использовании геодезических, геолого-морфологических, тектонических и сейсмических материалов.

Характерной особенностью карты является совпадение ориентировок линий равных скоростей и изосейст катастрофических Чиликского (1889 г.) и Кебинского (1911 г.) землетрясений, что указывает на связь в Северном Тянь-Шане современных вертикальных движений в данную эпоху с установленными зонами сейсмичности.

Ил. 1, табл. 1, библи. 5.

Закономерности деформаций земной коры в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня. А. К. Певнев, Т. В. Гусева, Н. Н. Одинев, Г. В. Сапрыкин. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 86—92.

На Гармском полигоне были проведены исследования с целью уточнения закономерности горизонтальных смещений в зоне Сурхобского разлома. Была создана сеть пунктов на участке разлома с контрастными вертикальными смещениями блоков земной коры.

Проведенные светодоальномерные и угловые измерения показали, что на исследуемом участке среднегодовая скорость горизонтальных смещений 15—20 мм; происходит сокращение расстояний, расположенных между пунктами, находящимися на противоположных бортах Сурхобского разлома. Сопоставление скоростей вертикальных и горизонтальных смещений для одних и тех же точек позволяет предположить, что обнаруженное явление можно трактовать как подвиг южного крыла разлома по поверхности, наклоненной на 30—40° к горизонту.

Ил. 4, библи. 5.

О движениях, регистрируемых в зоне Сурхобского разлома на станции Сары-Пуль. Л. А. Латынина, Т. В. Гусева, Н. А. Жаринов, Р. М. Кармалеева, О. Д. Никифорова, А. К. Певнев, А. А. Хоботко. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 92—100.

В зоне Сурхобского разлома, на профиле Гармского геодезического полигона создана подземная станция Сары-Пуль для наблюдения за современными движениями земной поверхности. Движения земной коры, выявленные как на поверхности, так и в штольне, хорошо согласуются между собой. Некоторые различия в величине этих смещений, очевидно, можно объяснить различием методов измерений на поверхности и в штольне.

Ил. 6, библи. 5.

Вертикальные движения реперов в зоне очагов Ашхабадских землетрясений. М. К. Курбанов, В. И. Лыков, С. С. Челпанов. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 100—104.

На основе физического моделирования перераспределения исходного регионального поля тектонических напряжений на неоднородностях типа разрывов, имитирующих разломы Прикопетдагского сейсмоактивного района, сделан вывод о том, какой участок передового разлома Копетдага является основой механизма очагов Ашхабадских землетрясений, и показано, как на данном участке должны распределяться повышенные и пониженные максимальные касательные напряжения. Сопоставление перераспределения напряжений с результатами повторных высокоточных нивелировок за период 1965—1974 гг. выявило, что на фоне регионального развития предгорного прогиба области относительной разгрузки характеризуются более интенсивными опусканиями.

Сделана попытка объяснить природу остаточных деформаций сейсмических событий 1948—1950 гг.

Ил. 3, библи. 2.

Горизонтальные колебательные движения реперов в зоне очагов Ашхабадских землетрясений. В. И. Лыков, А. И. Старченко, Э. Л. Шиханович. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 104—108.

В зоне сочленения глубинного Передового разлома Копетдага с оперяющими его разломами заложена система реперов для регистрации горизонтальных перемещений. Базы системы длиной до 3000 м промеряются не менее двух раз в сутки светодоальномерами СГ-3. В период регистрации подвижек повторение замеров доводится до 3—5 мин.

С мая 1974 г. зарегистрировано несколько типов разнонаправленных движений реперов. Представляет интерес знаменитое изменение баз с удвоенной амплитудой до 25 см (линейная деформация до 10^{-4}) и с переменным периодом от 30 мин до 5 ч, а иногда до 22 сут.

Замечено, что колебательные движения сопровождаются местными землетрясениями 10-го и более низких энергетических классов.

Ил. 5.

УДК 551.2 : 551.3

О соотношении эндогенных и экзогенных процессов на геодинамических полигонах. Н. С. Благоволит, С. К. Горелов, Г. И. Пшенин, В. А. Филькин, Е. А. Финько. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 108—114.

На геодинамических полигонах (Гармский, Крымский, Ашхабадский и др.) получены первые количественные данные об интенсивности экзогенных процессов. Временное и пространственное сопоставление этих данных с геодезическими материалами о современных смещениях земной поверхности позволяет наметить некоторые закономерности в их соотношении.

Ил. 4, библ. 8.

УДК 551.2+550.343.4

Горизонтальные движения по разломам Средней Азии и вопросы оценки сейсмической опасности. А. А. Никонов. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 114—123.

Рассматриваются движения по надвигам и сдвигам (с преимущественно или существенно надвиговой и сдвиговой составляющими соответственно) как медленные, так и быстрые (т. е. в связи с землетрясениями). Для позднего плейстоцена и более раннего времени быстрые и медленные движения разделять не удастся, поэтому их величины и скорости оцениваются суммарно.

Ил. 4, библ. 15.

УДК 551.241

Десять лет исследований современных движений земной коры в Донецком бассейне. В. С. Вереда, Ф. М. Урманцев, Б. К. Юрченко, В. Г. Суровцев, В. Г. Саенко, Ф. И. Динье. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 123—126.

Обсуждаются результаты девятилетних исследований современных движений земной коры в Донбассе на стационарном полигоне. Приводятся данные о характере вертикальных и первые сведения о горизонтальных движениях в Донецком бассейне.

Ил. 2, библ. 5.

УДК 551.224

Результаты и перспективы изучения пространственно-временных изменений скорости современных вертикальных движений земной коры в Карпатах. В. И. Сомов, И. Ш. Рахимова. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 126—132.

Высказаны соображения о прогнозировании современной тектонической активности на территории западной части СССР по совокупности геолого-геофизических признаков. Изложены первые результаты изучения геодезическим методом пространственных и временных закономерностей проявления современных вертикальных движений земной коры в Карпатах.

Ил. 2, библ. 11.

УДК 551.241.550.311

Связь современных вертикальных движений земной коры с геофизическими полями и глубинной структурой Карпат. В. Г. Кузнецова. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 132—138.

На основании корреляционного анализа геофизических и динамических параметров составлены схемы изоглубин поверхности Мохоровичича и современных вертикальных движений земной коры Карпат. В пределах основных блоков земной коры региона выполнено сопоставление современных деформаций с глубинной структурой. Отмечается, что для Карпатской геосинклинальной области характерна прямая связь между мощностью земной коры и скоростью современных вертикальных движений, которая устанавливается как в продольной, так и в поперечной структуре региона. Рассмотрена роль изостазии в современной динамике Карпат.

Ил. 3, библ. 13.

Некоторые результаты интерпретации современных движений земной коры в Эстонии. Х. Х. Сильдвэз, А. А. Мийдел. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 138—143.

Изложены итоги комплексной интерпретации современных вертикальных движений земной коры. Используются материалы геодезического, геолого-геоморфологического и геофизического методов исследований. Предполагается, что в общем поднятии территории, связанном с глубинными причинами, нельзя отрицать гляциостатистический фактор. Дифференцированные движения связаны, по мнению авторов, с зонами разломов фундамента и вызваны напряженным состоянием земной коры.

Ил. 2, табл. 1, библ. 11.

О развертывании работ по изучению горизонтальных движений земной поверхности в ЭССР. А. А. Торим. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 143—146.

Для детального изучения характера современных движений земной поверхности на территории ЭССР создано три небольших геодинамических полигона. Все полигоны выбраны в местах, интересных с геологической и геофизической точек зрения.

Полигон Виру-Нигула разбит в районе Азериского геологического разлома и предназначен для изучения относительных горизонтальных смещений на стыке двух земных блоков. Геодезическое построение полигона представляет четырехсторонник с длинами сторон 2—3 км. В 1974 г. все стороны и диагонали были измерены светодальномером СТ-3, а стороны, секущие разлом, и инварными проволоками.

Ил. 1, библ. 4.

О природе вертикальных движений земной поверхности на участке Апатиты — Титан линии повторного нивелирования Кольского геодинамического полигона. В. М. Яковлев, М. Т. Козлов, Г. Д. Панасенко. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 146—149.

Описываются техногенные вертикальные движения земной коры, обусловленные строительством жилых комплексов г. Апатиты.

Ил. 2, библ. 3.

Геодезические работы по изучению движений земной коры в районах строительства высоких плотин. Я. В. Наумов. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 152—154.

Наряду со строительством атомных и тепловых электростанций для удовлетворения нужд народного хозяйства и потребностей населения в девятой и десятой пятилетках планируется и создание широкой сети гидроэлектростанций, в том числе и в высокогорных сейсмоопасных районах (Таджикистан, Узбекистан, Грузия и др.).

Установлен факт возникновения сильных землетрясений в районах крупных водохранилищ. По наличию современных движений можно судить о накоплении напряжений в земной коре и предпринимать необходимые меры.

Основной метод количественных оценок деформации земной поверхности дает геодезия. Сейчас разработан и осуществляется на ряде строящихся ГЭС комплекс геодезических работ, который должен дать ответ на вопрос о наличии и характеристиках современных движений земной коры в этих районах, в том числе в момент заполнения водохранилища и после него.

Ил. 1.

Медленные изменения гравитационного поля Земли и современные движения земной коры. А. Ш. Файтельсон, Н. Т. Миронов, М. И. Юркина. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 154—162.

Описаны гравиметрические и астрономические данные об изменении гравитационного поля Земли, дана оценка эффекта Фоглера в результатах повторных нивелировок на Северном Кавказе, освещено влияние изменений силы тяжести вокруг обсерваторий в Полтаве, Харькове, Киеве и Горьком на смещения зенитов в них. Показано, что выводимые из повторного нивелирования вертикальные движения земной коры иногда могут быть объяснены изменениями земного гравитационного поля.

Ил. 6, табл. 4, библ. 25.

Современные вертикальные движения земной поверхности в нефтегазоносных областях (постановка задачи и результаты исследований на Грозненском и Речицком полигонах). А. Т. Донабедов, В. А. Сидоров, В. А. Филькин. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 162—168.

В ИГиРГИ разрабатывается новое научное направление — изучение современных движений земной поверхности — СДЗП, в соотношении с геофизическими полями, в нефтегазоносных и сопредельных областях.

Сопоставление СДЗП с распределением месторождений нефти показало, что последние характеризуются наибольшей современной активностью в отличие от структур, в пределах которых до настоящего времени получены отрицательные результаты и степень современной активности которых значительно ниже.

Сформулированы основные направления по использованию современных движений земной коры при поисково-разведочных работах на нефть и газ и программа дальнейших комплексных исследований современных деформаций земной коры в нефтегазоносных и сопредельных областях.

Ил. 4, библ. 2.

О точности нивелирования 1-го класса в горных районах. И. Н. Мещерский. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 169—171.

Рассмотрены основные источники погрешностей нивелирования 1-го класса в горных районах. При нивелировании в горах основным источником погрешности является погрешность, вызванная неточным знанием длины метра комплекта инварных реек во время работы в поле. Показана зависимость точности нивелирования от превышения. Даются рекомендации по отбору инварных реек для нивелирования в горах.

Исследование систематических ошибок и оценка точности прецизионного нивелирования в горных районах. С. В. Энман. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 171—177.

Приведены результаты исследования систематических ошибок прецизионного нивелирования в горных районах. Неправильный учет температуры во время нивелирования по температуре воздуха, а не реек вносит в результаты нивелирования систематическую ошибку, в среднем равную $\pm 0,3$ мм/км (максимальные ошибки возникают при нивелировании в осенне-зимние месяцы при низкой температуре воздуха в ясную погоду). Систематическая ошибка из-за использования неточного значения коэффициента линейного расширения реек равна $\pm 0,1$ — $0,2$ мм/км; из-за использования неточного значения длины метра реек — в среднем $\pm 0,4$ мм/км; из-за влияния рефракции — $\pm 0,1$ мм/км; из-за температурных деформаций скального репера — $0,1$ — $0,25$ мм/сек. Нивелирование в горах характеризуется случайной ошибкой $\eta = \pm 0,2$ — $0,4$ мм/км, средней суммарной систематической ошибкой $\sigma = \pm 1,0$ мм/км ($\pm 2,8$ мм на 100 м превышения). Предложены меры исключения или ослабления систематических ошибок.

Ил. 2, библ. 9.

Учет динамики визирного луча при высокоточных угловых измерениях и азимутальных определениях. Н. В. Яковлев. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 178—184.

Обсуждается простой по идее, экономически выгодный и в то же время эффективный метод исключения влияния боковой рефракции из результатов наблюдений углов и азимутов в геодезических сетях.

Ил. 4, библ. 4.

Опыт светодальномерных измерений повышенной точности в горных районах.

Н. Н. Одинов. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 184—187.

Приводятся результаты круглосуточных измерений на Гармском полигоне, наглядно подтверждающие выводы о характере и величинах влияния атмосферы на светодальномерные измерения.

Различными методами зондирования можно получить информацию о метеопараметрах на середине линии (весьма хорошее приближение к средним параметрам атмосферы). Введение поправки за атмосферу по этим данным позволяет повысить точность измерений на порядок.

Рассматриваются различные методы повышения точности светодальномерных измерений, границы их применимости и достижимые точности.

Ил. 5.

Возможности решения задач изучения современных движений земной коры в автоматизированной системе обработки, хранения и выдачи результатов нивелирования. Ю. А. Крюков. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 187—188.

Приводятся сведения об автоматизированной системе обработки, хранения и выдачи результатов нивелирования (центр нивелирования). Основой системы является информационный банк о нивелирной сети страны. Указывается структура информационных записей банка. Приводятся примеры задач, решение которых можно организовать в форме постоянных запросов системы.

Возможности совместного использования океанографических данных и данных геометрического нивелирования для определения высот реперов морских уровневых пунктов. Т. П. Корокина. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 189—193.

Описывается метод водного нивелирования. Анализ результатов измерений, выполненных на Кольском полуострове, показывает на высокую точность этого метода и позволяет считать его пригодным для надежной передачи высот по береговой линии моря на большие расстояния без продолжения ходов геометрического нивелирования.

Ил. 2, табл. 1, библ. 3.

Оценка точности геометрического нивелирования и вертикальных смещений земной поверхности с учетом корреляции ошибок измерений. В. К. Панкрушин, С. С. Челпанов, А. П. Кириенко. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 193—195.

При наблюдении за вертикальными движениями земной коры на Ашхабадском геодинамическом полигоне методом высокоточного геометрического нивелирования измерялись в каждую эпоху четыре превышения: левое и правое прямого хода и обратного. Значимые коэффициенты корреляции между ошибками этих превышений одной эпохи наблюдений легли в интервалах (+0,70, +0,95) для комбинаций превышений 1,2 и 3,4 и (-0,3, +0,3) для превышений 1,3; 1,4; 2,3; 2,4.

Значения ошибок нивелирования, вычисленные по известной формуле Д. А. Ларина с использованием средних разностей превышений прямых и обратных, правых и левых, практически совпали после того, как они были откорректированы с учетом полученных коэффициентов корреляции.

Библ. 2.

УДК (528.06+528.022) : 551.241

Эффект ошибок измерения азимута и длины базиса в компонентах деформации земной поверхности. Н. П. Есиков, В. С. Юдин. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 195—202.

Рассмотрено влияние ошибок измерения азимута и длины базиса на компоненты деформации участков земной поверхности.

Показано, что компоненты деформации несут не только новую информацию о современных движениях земной поверхности, но и обладают свойством разделять эффекты ошибок угловых и линейных измерений. Сдвиговая компонента деформации и направление главных осей тензора деформаций не зависят от ошибок измерения азимута и длины базиса, а зависят только от изменения углов в треугольниках. Дилатация и значения максимального и минимального растяжения несут в себе постоянный эффект от ошибок измерения базиса, а вращение — от ошибок измерения азимута.

Ил. 4, табл. 3, библ. 5.

УДК 551.242 : 528

Об изучении инвариантов современных движений земной коры. Н. П. Есиков. Современные движения земной коры. Новосибирск, «Наука», 1978, с. 202—207. Рассмотрена методика определения чистой деформации — сдвиговой компоненты и дилатации вертикального разреза верхней части земной коры по данным вертикальных движений. Показано, что на основе метода конечных элементов можно получить новую информацию о реакции земной коры на глубинные воздействия и тем самым более полно использовать вертикальные тектонические движения в решении вопросов сейсмического районирования, выделения структурных особенностей верхней части коры и поиске предвестников землетрясений.

Ил. 2, библ. 8.

2583

6858

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY