Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVI, вып. 2, 1974 г.

О МАКРО- И МИКРОРЕЛЬЕФЕ ПОВЕРХНОСТИ МОХОРОВИЧИЧА НА БАЛТИЙСКОМ ЩИТЕ

И. В. Литвиненко, Л. Н. Платоненкова, Н. И. Суворова

На Балтийском щите, в зарубежной и советской его частях, к настоящему времени проведен большой объем работ методами взрывной и обычной сейсмологии, позволяющий определить подошву консолидированной коры — поверхность Мохоровичича (М) — в различных его районах. В восточной части щита наиболее полные данные о строении поверхности М получены вдоль профиля Кемь — Ухта (рис. 1). Здесь

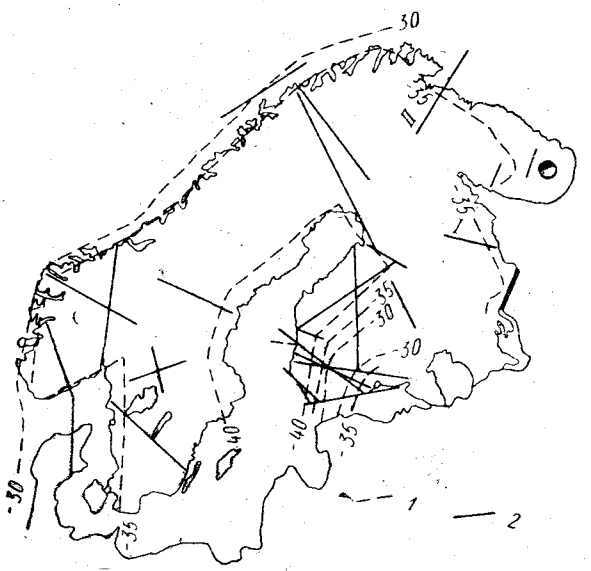


Рис. 1. Схема изогипс поверхности М для Балтийского щита [1, 6, 7, 8]

1 — изогипсы поверхности М, *км*; *2* — профили взрывной сейсмологии (*I* — Кемь — Ухта, *II* — Баренцево море — Печенга — Ловно)

при непрерывном профилировании выделены группы отраженных (докритических и закритических) и преломленных волн, связанных с поверхностью М, что позволило достаточно надежно охарактеризовать среднюю скорость для всего разреза коры, граничную скорость и рельеф — для поверхности М. Почти такой же детальности материалы для этой поверхности получены и для другого профиля: Баренцево море — Печенга — Ловно.

На профилях в восточной части Кольского полуострова и в юго-восточной Карелии представление о положении поверхности М получено попутно (при детальном изучении верхних частей коры) лишь по докритическим отраженным волнам. Эти данные хотя и отличаются высокой точностью определения глубин и углов наклона глубинных сейсмических границ, не могут охарактеризовать поверхность М по основному параметру — граничной скорости. Докритические отраженные волны, отнесенные в этих районах к поверхности М, динамически достаточно хорошо выражены и типичны для этой поверхности, что дает основание принимать их во внимание при выяснении основных черт макрорельефа поверхности М для всего щита.

В юго-восточной части Карелии вблизи профиля Белое море — Онежское озеро имеется также несколько точечных зондирований, где параллельно с изучением основного продольного профиля, на коротких базах удалось выделить отраженные волны. Наличие двух-трех линий наблюдений длиной до 2 *км*, пересекающихся в центре каждого зондирования, дало возможность определить пространственное положение отражающих элементов, связанных с поверхностью М. Два подобных зондирования выполнены в Кандалакшском районе и в Северной Карелии. Кроме того, для Кольского полуострова имеются отдельные определения мощности земной коры по данным регистрации землетрясений (Г. Д. Панасенко), а в южной Карелии — исследования обменных волн (в том числе связанных с поверхностью М) от удаленных землетрясений (Н. К. Булин).

За рубежом основная часть исследований по определению глубины залегания поверхности М выполнена в южной Финляндии и в южных частях Швеции и Норвегии. В отличие от отечественных работ, исследования за рубежом проведены более схематично: пунктирным профилированием вдоль протяженных маршрутов, результаты исследований представлены в виде схематических разрезов или осредненных для целых районов значений глубин и скорости продольных волн для поверхности М. Более подробные сведения о методике отечественных и зарубежных работ по определению поверхности М приведены в работах [1, 2, 6, 7, 8].

Данные взрывной сейсмологии существенно неодинаковы для различных районов щита как по детальности, так и по точности. Сейсмические наблюдения поверхностных и обменных волн, землетрясений как известно, дают возможность определить поверхность М, но по точности эти данные, особенно данные изучения поверхностных волн, значительно уступают результатам взрывной сейсмологии. Однако вопрос об изучении, хотя бы в общих чертах, макрорельефа поверхности М для всего Балтийского щита — региона древнейшей стабилизации коры — имеет большое значение для выяснения истории развития материковой коры и для решения других проблем геологии. В последнее время делаются попытки сопоставить между собой имеющиеся разнородные данные и получить общие сведения о макрорельефе поверхности М для зарубежной и советской частей и для всего щита [1, 6, 7, 8]. На рис. 1 схематически показаны изогипсы этой поверхности для всего щита. Для западной части положение изогипс взято из работы [6], в которой обобщены последние зарубежные данные норвежских, шведских и финских исследователей [7, 8 и др.]. Для восточной части щита изогипсы указаны по данным отечественных исследований. С учетом возможных неточностей (до 3%) в определении средней скорости для всего разреза коры и отдельных ошибок в отнесении отраженных волн к поверхности М, изогипсы проведены через 5 *км*.

Несмотря на схематичность данных, можно наметить некоторые выводы об основных особенностях макрорельефа поверхности М для всего щита. Прежде всего кора щита резко отделяется увеличенной мощностью от коры Атлантического океана. Намечается простирание изогипс, согласное с географическими границами щита. Максимальные мощности коры (свыше 40 *км*) устанавливаются в области Ботнического залива. Для краевых частей щита характерно уменьшение мощности до 30 *км*. На этом фоне увеличение мощности коры в области более молодых образований каледонид Норвегии проявляется значительно слабее, чем это предполагалось по гравитационному полю.

Таким образом, на формировании коры щита существенно сказались, по-видимому, не только ранние этапы ее развития в докембрии, но и более поздние, когда щит обособился от окружающих его регионов. На это указывает намечающееся некоторое совпадение современных контуров кристаллического щита с положением изогипс поверхности М. Если это предположение подтвердится, можно ожидать, что щит отделяется в настоящее время от Русской платформы зоной с несколько приподнятым залеганием поверхности М. Эта зона охватывает Белое море, Онежское, Ладожское озера и Балтийское море, за исключением Ботнического залива. Последний, вероятно, существенно отличается по своему глубинному строению от перечисленных акваторий.

Наметившееся увеличение мощности коры в центре и уменьшение ее в краевых частях щита можно связывать с процессами воздымания щита, проявившимися особенно заметно после прекращения последних оледенений. Вероятно, процессы взаимодействия верхней мантии и низов коры щита были достаточно активны и в посткембрии. В процессе воздымания щита кора наращивалась быстрее, чем происходила эрозия ее верхних частей.

Для того чтобы достаточно обоснованно развить выдвинутые положения, необходимо проверить дополнительными исследованиями наличие уменьшенной по мощности коры в полосе, проходящей через Белое море — Онежское озеро — Ладожское озеро — Финский залив. Различие в строении коры щита и Атлантического океана известно давно и не вызывает сомнений. Дополнительные работы должны быть выполнены методом преломленных волн с тем, чтобы выделить поверхность М по основному ее параметру — граничной скорости.

Результаты детальных исследований земной коры на территории СССР указывают на возможность изучения не только макрорельефа поверхности М в региональном плане, но и более тонких особенностей ее строения — микрорельефа, подобно тому, как это делается для сейсмических границ в верхних частях коры [1]. При непрерывном профилировании вдоль профилей Кемь — Ухта и других, как известно [1, 2], прослежена сложная группа отраженных волн, относимых к поверхности М (рис. 2). Подобные волновые поля зарегистрированы и при взрывах из карьеров и рудников (рис. 3). Отдельные волны в отмечаемой группе прослеживаются не повсеместно. Время Δt между четко разделяющимися в группе волнами составляет 0,2—2,0 *сек*. В целом группа отраженных волн обладает характерной высокой интенсивностью.

В данной статье рассматриваются некоторые материалы ГСЗ по профилю Кемь — Ухта, точечных зондирований по линии Белое море — Онежское озеро и опытных работ по регистрации на больших удалениях крупных взрывов из карьеров и рудников. Решение пространственной задачи для отраженных от поверхности М волн по профилю Кемь — Ухта, выполненному по одному маршруту, оказалось возмож-

ным благодаря наличию почти непрерывной корреляции отражений и значительным изгибам линии профиля, проходящего вдоль автомобиль-

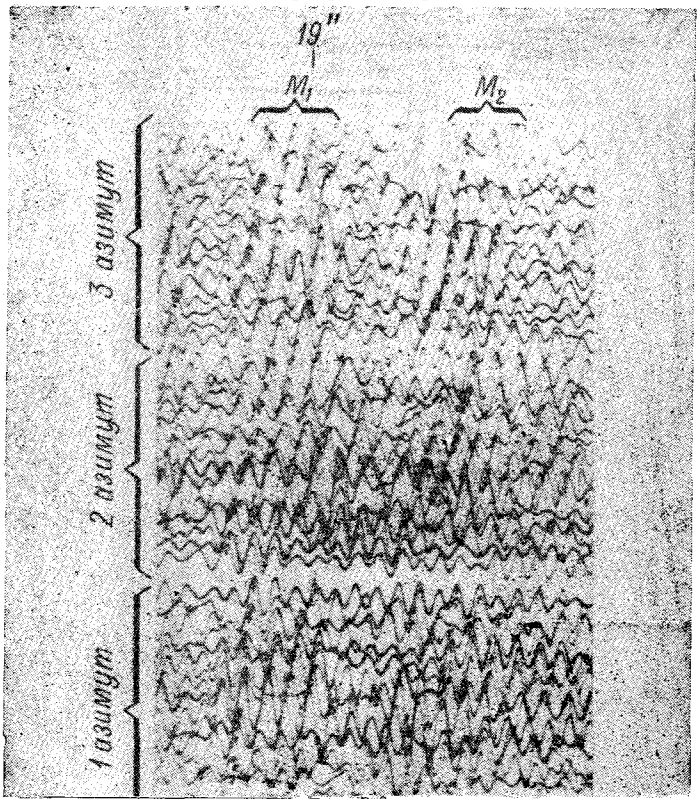


Рис. 2. Запись в трех азимутах группы отраженных от поверхности М волн. Профиль Онежское озеро — Белое море. Сейсмостанция «Поиск-1-48-КМПВ-ОВ», заряд 1600 *кг*

ной дороги. При точечных сейсмозондированиях лучшими схемами размещения сейсмоприемников на местности являются крестовые, звездча-

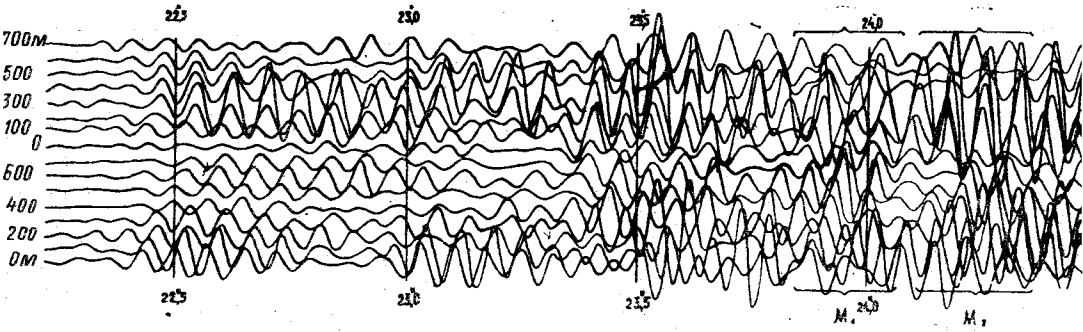


Рис. 3. Запись взрыва из карьера в районе Кировска (при удалении 130 *км*) с двумя волнами M_1 и M_2, отраженными от поверхности М. Сейсмостанция «Поиск-1-48-КМПВ-ОВ», заряд 50 *т*

тые и замкнутые [3]. Они позволяют получить более надежное положение вектора максимального градиента времени отраженной волны τ_x

[4, 5]. Наблюдения по профилю Кемь — Ухта велись по сильно изгибающейся линии, образующей иногда даже петли. Для определения τ_s использовалось множество точек, расположенных вблизи резких изгибов профиля (рис. 4); значения τ_i определялись по разности времени t_0 (точка A) и t_i (точки 1, 2...). Геометрическое место точек концов элементарных векторов градиента поля времени по каждому направлению представляет собой окружность, проходящую через точку A. Положение конца суммарного вектора τ_s, являющегося диаметром этой окружности, можно определить как точку пересечения перпендикуляров к концам векторов τ_i. Такой способ определения τ_s несколько повышает надежность определения полного вектора градиента времени и, следовательно, положения в пространстве отражающего элемента.

По линии Онежское озеро — Белое море регистрация взрывов выполнена специальными «звездчатыми» зондированиями, составленными тремя линиями, пересекающимися под углом 120°, которые дали возможность достаточно надежно определить величины максимального градиента поля времени отраженных волн, связываемых с поверхностью М. По полученным градиентам известными приемами определено положение соответствующих отражающих элементов.

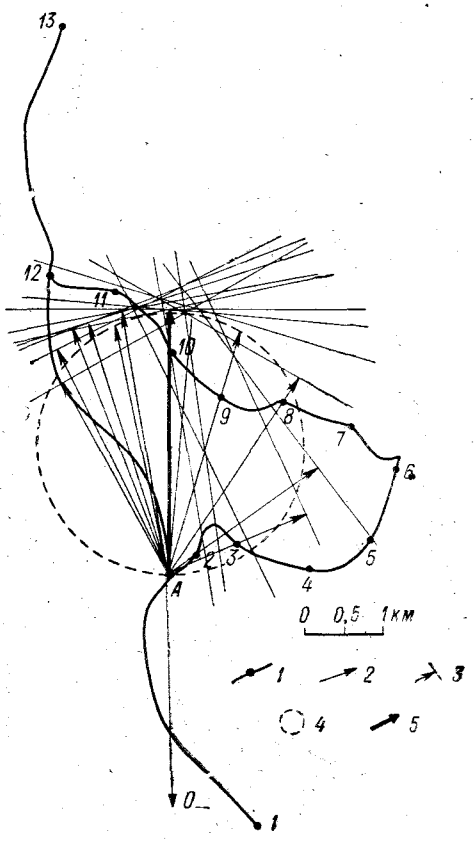


Рис. 4. Определение полного вектора градиента поля времени отраженной волны τ_s с использованием петли маршрута Кемь — Ухта

1 — маршрут Кемь — Ухта с пунктами определения градиентов поля времени τ_i; *2* — направление на пункт взрыва; *3* — векторы градиентов τ_i и перпендикуляры к ним; *4* — геометрическое место точек концов векторов τ_i; *5* — полный вектор τ_s

По профилю Кемь — Ухта представлены схема векторов падения отражающих элементов и предполагаемые схематические изогипсы поверхности М для наиболее протяженной и интенсивной волны, отраженной от этой поверхности (рис. 5). Для оценки степени надежности, с которой установлено положение векторов падения и соответствующие элементы залегания, что определяется в основном степенью надежности вычисления τ_s, использованы такие показатели, как угол α рассеяния точек пересечения перпендикуляров к τ_i и количество n определений τ_i. Чем меньше α и больше n, тем надежнее определение τ_s и, следовательно, положение отражающего элемента в пространстве. Другим фактором, влияющим на точность определения положения отражающего

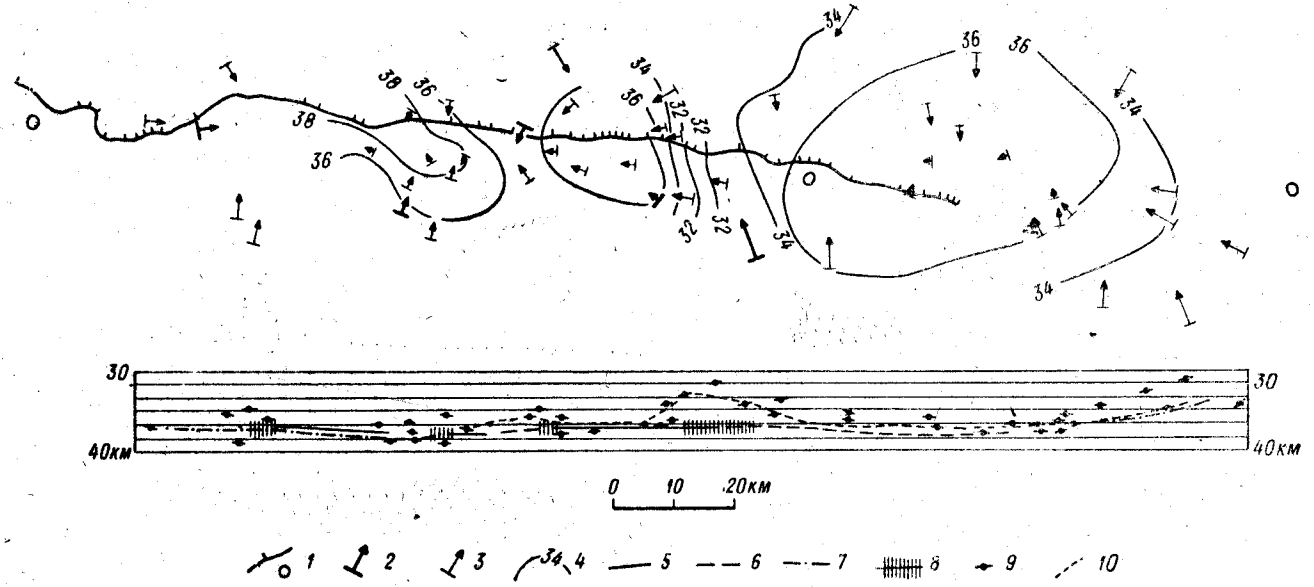


Рис. 5. Результаты построений отражающих элементов поверхности М по профилю Кемь — Ухта

1 — маршрут профиля, пункты определения τ_s и пункты взрыва; векторы падения отражающих элементов поверхности М и надежность их определения: *2* — $\alpha/n < 1$, *3* — $1 < \alpha/n < 5$; *4* — изогипсы поверхности М, *км*; границы, построенные способом полей времен по годографам основных групп преломленных волн: *5* — встречным, *6* — одиночным, *7* — то же для отраженных волн; *8* — участки границы, соответствующие разрывам в корреляции на годографах ГСЗ; *9* — отражающие элементы поверхности, полученные путем решения пространственной задачи; *10* — осредненное положение границы М по результатам пространственных построений

элемента в пространстве, является правильный выбор средней скорости v.

Схематические изогипсы вдоль профиля Кемь—Ухта рисуют достаточно сложную поверхность с перепадом глубины от 38 до 32 *км*. Линия схематического разреза, полученного в результате пространственных построений, совпадая в общих чертах с границей, построенной ранее [2] способом полей времен по годографам основных групп преломленных волн, свидетельствует об усложнениях в микрорельефе поверхности М. На значительном участке этого профиля вслед за первой отраженной от поверхности М волной M_1 отчетливо прослеживается вторая волна M_2, идентичная первой по кинематическим и динамическим характеристикам (рис. 6). Пространственные построения отражающих элементов выполнены для обеих волн по вектору τ_s, определенному по одним и тем же точкам профиля со скоростью $v=6{,}4$ *км/сек*. При этом оказывается, что полученные векторы падений располагаются определенным образом: для первой волны — севернее линии профиля, для второй — южнее. По глубине все отражающие площадки находятся примерно на одном уровне,— имеется возможность рисовать единую для обеих групп отражающих элементов схему изогипс поверхности М.

Этот вывод имеет принципиальное значение, так как помогает выяснить причины формирования сложных групп волн. Если не учитывать микрорельефа отражающей поверхности, можно ошибочно приписывать новую границу каждой из волн.

На линии Онежское озеро — Белое море (см. рис. 1) группы рассматриваемых отраженных волн, зарегистрированных на разных сейсмозондированиях, различны по интенсивности, количеству волн (от двух до четырех), качеству записи. Пространственные построения (рис. 7) выполнялись для двух первых в группе волн, наиболее интенсивных и прослеживаемых повсеместно. Отражающие элементы, соответствующие обеим волнам, дают также единую схему изогипс поверхности М, рисуя, как и на профиле Кемь — Ухта, сложный микрорельеф с изменением глубины от 32 до 38 *км* и углами наклона до 15°. Средние квадратические погрешности определения координат центров отражающих площадок и их углов наклона те же, что и на профиле Кемь — Ухта. Осредненный разрез подчеркивает сложность микрорельефа поверхности.

В заключение заметим, что регистрация крупных промышленных взрывов (десятки и сотни тонн ВВ) сейсморазведочной аппаратурой по методике точечных зондирований представляет значительный интерес, так как появляется возможность изучать глубинные границы земной коры. Первые опыты на Балтийском щите показали перспективность этого направления. Получены записи интенсивных отраженных волн, связанных с поверхностью М, при удалении от пункта взрыва до 550 *км*. При расстоянии между пунктами взрыва и приема, равном 130 *км*, время длительности пакета отраженных волн, связываемых с поверхностью М, составляет 0,5 *сек* (см. рис. 3); при бо́льших расстояниях группа волн существенно разрастается. Так, при записи взрыва (заряд 50 *т*) в районе Кировска отраженные от поверхности М волны образовали сложную и протяженную группу длительностью 1,5 *сек*. Относительно простой записью обладают лишь первые две волны, для которых выполнимы пространственные построения. Представляется целесообразным шире использовать взрывы в карьерах и рудниках для изучения рельефа поверхности М. Основным затруднением при этом является учет сложной схемы многоступенчатого взры-

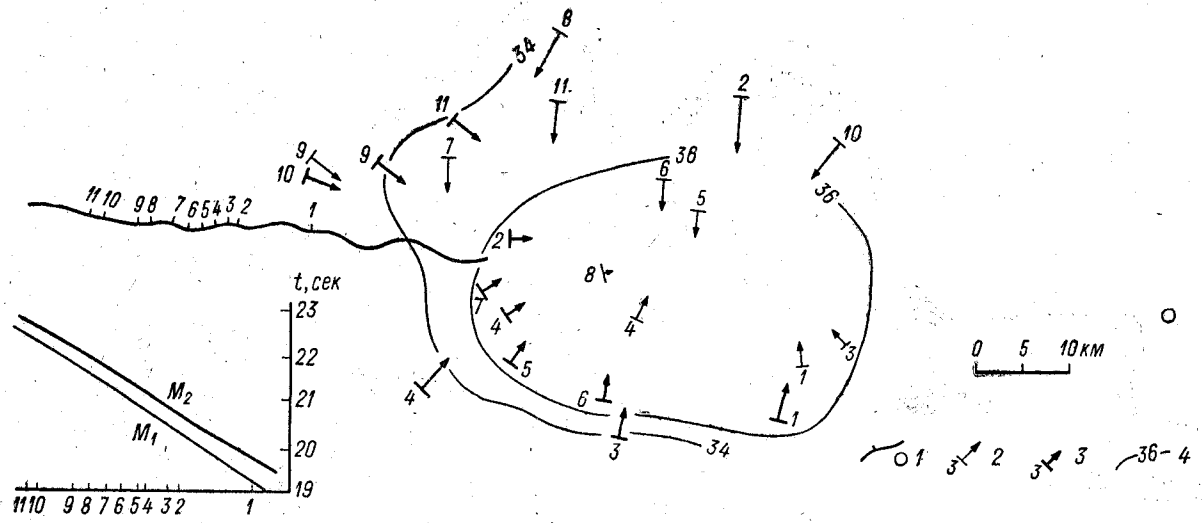


Рис. 6. Схема изогипс с векторами падения отражающих элементов, построенная по двум отраженным от поверхности М волнам для участка профиля Кемь — Ухта

1 — линия профиля с точками определения τ_s и пункт взрыва; векторы падения отражающих элементов и номера точек определения τ_s; *2* — для волны M_1, *3* — для волны M_2; *4* — схематические изогипсы поверхности М, *км*

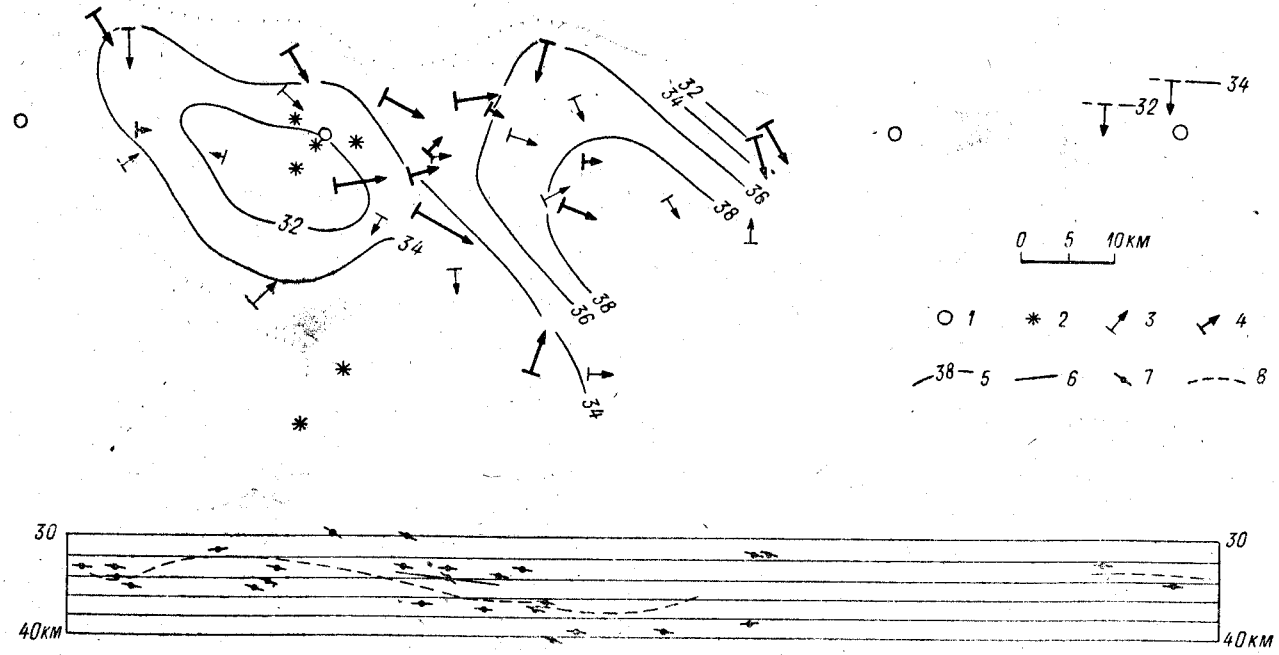


Рис. 7. Результаты пространственных построений отражающих элементов поверхности М по профилю Белое море — Онежское озеро

1 — пункты взрыва; *2* — точечные крестовые зондирования; векторы падения отражающих элементов поверхности М: *3* — по волне M_1, *4* — по волне M_2; *5* — схематические изогипсы поверхности *М*, *км*; граница *М*: *6* — по протяженному продольному годографу отраженной волны, *7* — по результатам точечных зондирований, *8* — осредненное положение

вания в карьерах, что вносит существенные дополнительные искажения в запись волн, а также определение природы зарегистрированных волн. Последнее затруднение, как показал опыт работ, можно почти полностью устранить, используя эталонные годографы профильных наблюдений ГСЗ.

Расширение работ по изучению макро- и микрорельефа поверхности М с помощью отраженных волн несомненно позволит получить новые, более детальные данные о структурах земной коры Балтийского щита. Особый интерес представляет изучение микрорельефа поверхности М и других внутрикоровых границ вблизи глубинных разломов и в структурно-фациальных зонах, перспективных на поиски эндогенного оруденения. При изучении рельефа глубинных сейсмических границ необходимо продолжить совершенствование методики определения пространственного положения отражающих элементов, что может быть достигнуто учетом изменений скоростных разрезов по площади и на глубину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита. Л., Недра, 1968.
2. Глубинное сейсмическое зондирование земной коры в СССР. Л., Гостоптехиздат, 1962.
3. Завьялов В. Д., Столярова Е. Н. Сейсморазведочные работы методикой массовых пространственных зондирований (МПЗ). Прикладн. геофизика, 1957, вып. 17.
4. Пузырев Н. Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. М., Гостоптехиздат, 1959.
5. Ризниченко Ю. В. Пространственная задача интерпретации годографов отраженных волн.— Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1946, № 1.
6. Penttilä E. Crustal structure in Fennoscandia from seismological and gravimetric observations.— Annales Academiae scientiarum Fennicae, ser. A III. Geologica—geographica, 110. Helsinki, 1972.
7. Sellevoll M. A. Report from the Sub—Commission on explosion work in Northern Europe. Prepared for the European Seismological, meeting in Luxemburg, 21—29 sept. 1970. Bergen, 1970.
8. Vogel A. Deep seismic sounding in Northern Europe. Proceedings of the colloquium on deep seismic sounding in Northern Europe held in Uppsala on december 1, and 2, 1969. Stockholm, 1971.