

И. В. Ананьин, Н. К. Булин, Э. Р. Клааманн  
**Осмуссаарское (Эстонское) землетрясение**  
**25 октября 1976 г.**

В западной части Финского залива около о-ва Осмуссаар (Эстонская ССР) 25 октября произошло землетрясение, которое ощущалось от о-ва Сааремаа (юго-западнее эпицентра) до г. Лишпенранта и от г. Тампере на севере до р. Пярну в Эстонии. За р. Пярну землетрясение ощущалось в отдельных небольших районах. Инструментальные данные см. в [1].

**Геологические условия и краткая характеристика сейсмичности района землетрясения**

С точки зрения геологического строения охваченная землетрясением территория Эстонии представляет собой пологую моноклиналь, фундамент которой сложен различными сильно складчатыми магматическими и метаморфическими породами архея и протерозоя, а осадочный чехол представлен в своей нижней части песчаными отложениями кембрия, на которых залегают песчаники, сланцы и известняки ордовикской системы. Начиная с широты города Хаапсалу, последние в свою очередь перекрываются карбонатными отложениями силура. Поверхность фундамента на о-ве Осмуссаар залегает на глубине 170 м, а к югу и юго-востоку от него на расстоянии 100 км погружается до отметки 500 м.

По данным комплексных геофизических исследований фундамент на территории Эстонии разбит глубокими разломами на многочисленные блоки различной величины. Анализ простираций всех разрывных нарушений кристаллического фундамента, выделенных по геофизическим данным, показал, что имеются две системы взаимно перпендикулярных нарушений: широтные и меридиональные, а также диагональная система с нарушениями северо-западного и северо-восточного простираций [2].

Анализ карт вертикальных движений земной коры, построенных по уровнеммерным данным и по результатам повторных нивелировок, показывает, что, вероятно, движения происходят преимущественно по разломам северо-восточного простираения [3]. Характер этих движений связывается с общими закономерностями поднятия Фенноскандии. Повторные нивелировки на территории Эстонии показывают, что скорости современных движений изменяются в северо-западном направлении не плавно, а в некоторых местах имеют большие скоростные градиенты по вертикали, особенно в районе течения р. Пярну [4]. Вторая зона больших градиентов вертикальных движений намечается в районе о-ва Осмуссаар. Это указывает на повышенную тектоническую активность этих зон. А так как они являются "живущими" зонами разломов, то в них могут накапливаться упругие напряжения, которые при определенных условиях и порождают землетрясения.

Анализ карты эпицентров землетрясений, построенной по Каталогу землетрясений Бота с 1891 по 1950 г. [5], показывает, что слабые землетрясения с  $M = 2 \div 2,9$  практически наблюдаются на всей территории Фенноскандии. Они зарегистрированы сейсмическими станциями на северном побережье Финского залива и даже на Карельском перешейке, в 60 км севернее Ленинграда. В районе г. Хельсинки имеются эпицентры с  $M \leq 4 \div 4,9$ . В других литературных источниках (см., например, [6]) описываются землетрясения, происходившие ранее на территории Прибалтики. В январе и феврале 1923 г. ощущались землетрясения от Риги до Ленинграда.

тальным данным в 1973 г.; здесь зарегистрировано землетрясение с  $M_{LN} = 3,8$ . Два землетрясения произошли на севере Якутии и одно в море Лаптевых, в районе выклинивания подводного хребта Гаккеля. Три землетрясения отмечены в Центральном Арктическом бассейне, где ежегодно регистрируются толчки с магнитудой  $M_{LN} \approx 4 \div 4,5$ . Наиболее сильное землетрясение, имеющее магнитуду  $M_{LN} = 4,5$ , произошло на севере Корякского хребта.

Как и ранее, наибольшая активность проявилась в центральной части Арктической зоны, приуроченной к простиранно структур, слагающих хребет Гаккеля.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Дзязрева А. Л. Землетрясения Арктики. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1969 году. М.: Наука, 1973.
2. Параметры, амплитудные и фазовые частотные характеристики приборов опорных сейсмических станций СССР, 1974 год. Приложение к Сейсмологическому бюллетеню сети опорных сейсмических станций СССР. М.: АН СССР, 1976.
3. Оперативный сейсмологический бюллетень (ежедекадный). М.: ИФЗ АН СССР, 1976.
4. Preliminary determination of epicenters. Nat. Earthquake Inform. Serv., U.S. Dept. Inter., 1976.
5. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях. Единой системы сейсмических наблюдений СССР. ИФЗ АН СССР, 1966.

15 января 1858 г. землетрясение ощущалось севернее и северо-восточнее о-ва Хийумаа, в результате чего дважды (соответственно на 85 см и 1 м) внезапно поднялся уровень воды, а в устьях рек в г. Кярдла и в дер. Кьргессааре стоявшие в море близ берега на якоре рыболовные лодки были выброшены на берег.

16 октября 1877 г. слабое землетрясение ощущали на сравнительно большой территории от о-ва Осмуссаар на севере до пос. Лихула на юге и от дер. Кяйна на о-ве Хийумаа до дер. Ристи на материковой части Эстонии. Жителями этого района были замечены скрип конструкций деревянных зданий, предвезжание окон и посуды, ствиг и опрокидывание неустойчивых предметов и слышен гул, напоминавший выстрел крупнокалиберной пушки. Центром области ощущимых толчков был район о-ва Вормси.

28 января 1881 г. в районе г. Нарвы ощущалось землетрясение в радиусе 10–15 км ( $I_0 \sim 6$  баллов;  $M = 3 \div 3,5$ ;  $h = 3 \div 5$  км).

8 января 1909 г. в районе г. Вильноса произошло сильное землетрясение. "В земле образовалась трещина длиной более одной версты" [6].

Таким образом, даже этот сравнительно небольшой перечень землетрясений свидетельствует о том, что в Прибалтике и в прибрежной зоне Эстонии происходили и происходят, хотя и редко, довольно сильные землетрясения силой до 6–7 баллов.

#### Описание результатов обследования Осмуссаарского землетрясения

Авторами была обследована вся территория западной Эстонии, включая о-ва Моонзундского архипелага. Для уточнения границы ощущимых человеком колебаний использованы данные, полученные по телефонным запросам из городов и крупных населенных пунктов всех административных районов республики. Собранный материал обработан по сейсмической шкале MSK-64. На основе полученных данных составлена карта изосейст (рис. 1).

Как видно из этой карты, данное землетрясение ощущалось на сравнительно большом пространстве как 3–4-балльное. Лишь на крайнем северо-западе материковой части Эстонии можно было провести изосейсты 5 и 6 баллов, оконтуривающие небольшие пространства. В 6-балльной зоне практически отсутствуют повреждения зданий благодаря хорошему качеству построек и высокочастотному характеру спектра сейсмических волн.

В 5–6-балльной зоне в двух случаях образовались трещины в одноэтажных зданиях одинаковой конструкции (деревянные дома с сепкатной обкладкой, укрепленной через каждые три ряда камней 5-миллиметровой проволокой или гвоздями).

В дер. Ныва в обкладке стены образовалась трещина 1–2 мм. Внутри этого дома во время землетрясения переместилась на 1 м к северу спиральная машина (на колесах), разбилась люстра, в шкафу опрокинулись рюмки и статуэтки. Толчки сопровождались взрывообразным гулом. Из ульев вылетели пчелы. В нескольких километрах северо-западнее от этого места, в лесу, развалилась незаконченная поленица дров, сильно зашумели деревья, еще не потерявшие листву, и по траве прошла хорошо заметная волна.

На о-ве Ноароотси в дер. Пюккси образовались трещины в каменной обкладке, аналогичной вышеописанной, но их значительно больше, и в одном случае трещина в стенке длиной около 1,5 м пересекла также фундамент, выложенный из известняка. Внутри дома возникла трещина шириной 10 мм на стыке деревянной стены и кирпичной дымовой трубы.

На о-ве Осмуссаар, вероятно в эпицентральной зоне, все жители, находившиеся на острове, говорили об ощущении толчков снизу, в то время как на материковой части большинство утверждало, что гул и колебания пришли к ним с севера или северо-запада. Толчок на о-ве Осмуссаар вызвал сильное дрожание зданий, продолжавшееся несколько секунд. Направление толчков вертикально снизу подтверждает тот факт, что стоявший в квартире неустойчивый макет Османской телевизионной башни подпрыгнул и не опрокинулся. У людей, нахо-

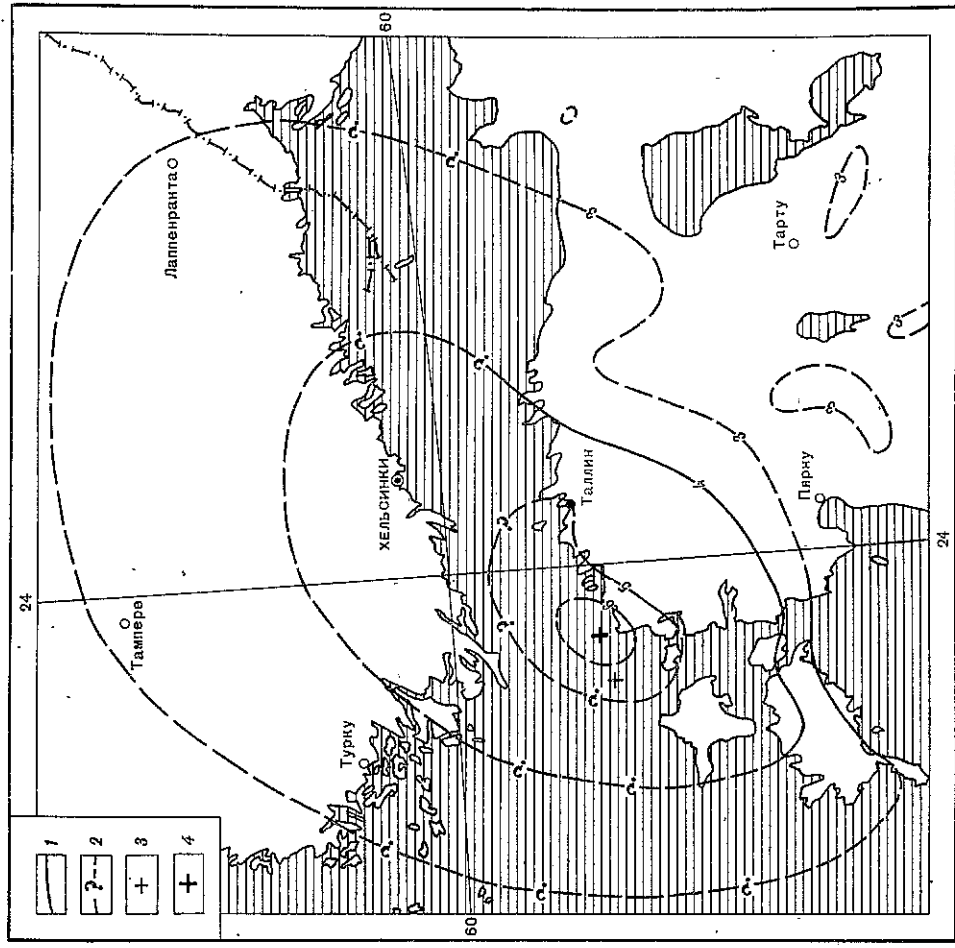


Рис. 1. Карта изосейст Осмуссаарского землетрясения 25 октября 1976 г.

Изосейсты: 1 — надежные; 2 — предполагаемые; 3 — эпицентр, определенный по данным оперативного сейсмологического бюллетеня; 4 — то же, по данным авторов

двигавшихся в это время на берегу, из-под ног "уходила" щебенка. С наклонной поверхности берега полностью сполз дерн. На высокоом обрывистом северо-восточном берегу на 1,5-километровом отрезке произошел сплошной обвал висевших над волноприбойной нишей крупных известковых глыб размером до 5 м.

Через 10 м после основного толчка произошел первый афтершок, который ощутили все люди под открытым небом. Толчок сопровождался взрывообразным гулом, а его сила оценена в 4–5 баллов. Через полчаса последовал следующий афтершок. В течение 15 с ощущались колебания здания и слышался звон аппаратуры (3–4 балла). Следующий афтершок жители о-ва Осмуссаар ощутили 8 ноября в 13 ч 17 м (4–5 баллов).

На основе анализа всей макросейсмической информации можно заключить следующее:

- 1) наиболее вероятным местоположением эпицентра является о-в Осмуссаар или его ближайшие окрестности;
- 2) балльность в эпицентре  $I_0 = 7$ ;
- 3) глубина очага, определенная по скорости спадания балльности с расстоянием (при коэффициенте спадания балльности  $S = 2$ ), равна  $15 \pm 5$  км;

## Основные параметры афтершоков Осмуссарского землетрясения

Дата	Время в очаге по Гринвичу, ч м с		Географические координаты эпицентра		Глубина очага $h$ , км
	$\varphi^{\circ} N$	$\lambda^{\circ} E$	$\varphi^{\circ} N$	$\lambda^{\circ} E$	
8.XI	10 17	0,7 ± 0,5	59°19,7' ± 1,0	23°28,5' ± 1,0	0-13
22.XI	15 13	42,5 ± 0,5	59°19,5' ± 1,0	23°25,4' ± 1,0	13 ± 2

Таблица 2

Экспериментальные значения  $V_P/V_S$  для афтершоков Осмуссарского землетрясения

Дата	Отношение амплитуд $S$ - и $P$ -волн, $A_S/A_P$		Значение кажущейся скорости по годографу, км/с		Отношение скоростей продольных и поперечных волн
	пределы	$(A_S/A_P)_{ср}$	$V_P$	$V_S$	
8.XI	5,0-9,0	7,0	6,6	3,7	1,76 ± 0,03
22.XI	1,2-6,0	4,0	6,75	3,75	1,79 ± 0,03

динаты и находится в 5-7 км северо-восточнее о-ва Осмуссаар. На открытом канале записи афтершоков высокочастотные (8-20 Гц) и совершенно не содержат верхностных волн, благодаря чему они легко распознаются среди записей близких взрывов ( $\Delta \leq 60$  км). Минимальные значения  $t_{S-P}$  равны 2,4 с, максимальные — 5,8-5,9 с; эпицентральные расстояния равны соответственно 14 и 50 км.

Для афтершока 8.XI можно указать лишь вероятный интервал глубины гипоцентра (0-13 км, ближе к 5-10 км). Для оценки глубины очага афтершока 22.XI использован следующий приближенный способ (точные способы неприменимы в связи с односторонним положением станций относительно эпицентра). Истинное положение эпицентра было определено по данным трех "дальних" станций. По  $\Delta$  для станции, ближайшей к очагу, мы построили серию зависимостей  $t_{S-P}$  от глубины очага для нескольких скоростных моделей среды ( $V_{0P} = 5,7 \div 6,3$  км/с, где  $V_{0P}$  — истинная скорость в верхней части фундамента). Совпадение расчетных  $t_{S-P}$  для разных моделей с наблюдаемым (2,4 с) достигается в интервале глубин  $H = 13 \pm 2$  км.

Глубина афтершока 8.XI меньше, чем глубина землетрясения 22.XI, что подтверждается следующими данными: 1) длительность записи 8.XI в полтора раза больше, чем для афтершока 22.XI (табл. 2); 2) значения  $V_P$  и  $V_S$  для афтершока 8.XI меньше, чем для афтершока 22.XI. Судя по записям "неподвижной" станции, афтершоки 8.XI и 22.XI достаточно сходны, однако между ними имеются и различия: величина  $A_S/A_P$  для афтершока 8.XI почти в два раза больше, чем для толчка 22.XI (см. табл. 2); для афтершока 8.XI отмечено неодновременное (0,1-0,15 с) вступление  $S$ -волны на компонентах СВ и ЮВ. Эта особенность сейсмических записей качественно указывает на то, что среда, в которой расположен гипоцентр 8.XI, более анизотропна, чем среда гипоцентра 22.XI.

По данным интерпретации наблюдений преомленных волн  $P_S$  от землетрясений и промышленных взрывов<sup>1</sup> строение земной коры в районе главного толчка и

<sup>1</sup> Для определения глубины грани раздела использован скоростной разрез, составленный для южной части Балтийского щита [9], методика построения глубинного разреза описана в [13].

4) при бальности в эпицентре  $I_0 = 7$  и глубине очага  $h = 15$  км магнитуда  $M = 4,7$ ;

5) если глубина очагов афтершоков также равна 15 км, то магнитуда соответственно для них будет:  $M \approx 3,5$  (25.X в 12 ч 07 м),  $M \approx 3,0$  (25.X в 12 ч 10 м),  $M \approx 3,5 \pm 0,5$  (8.XI в 13 ч 17 м).

## Инструментальные сейсмические наблюдения в эпицентральной зоне

Институтом ВСЕГЕИ Министерства геологии СССР совместно с Институтом геологии АН ЭССР в период с первого по девятое ноября проведены детальные наблюдения с целью локализации афтершоков и определения глубинного строения земной коры по сейсмическим данным<sup>1</sup>. Использовались сейсмические станции магнитной записи АСС-3 ("Черепаша"). По своим параметрам эта аппаратура относится к типу станций "Земля" [7].

В качестве сейсмоприемников использовались приборы НСП-3 с частотой собственных колебаний 1 Гц (вертикальный прибор и два горизонтальных магнитных азимутах 30° СВ и 120° ЮВ). Служба времени обеспечивалась кварцевыми часами с точностью ± 0,1 с. Станции работали в пятиступенчатом режиме непрерывной регистрации при скорости проляжки магнитной ленты 1 мм/с. Воспроизведение обзорных и детальных сейсмограмм осуществлялось на станции ВСС-12. Детальные сейсмограммы записаны на четырех каналах (один открытый) при коэффициентах трансформации 25 и 50 и скорости протяжки осциллографной бумаги (осциллограф Н-100-МЧ) 10-25 мм/с.

В работе использовалось от трех до пяти станций АСС-3, которые устанавливались по возможности на выходах коренных пород силурийского или ордовикского возраста: Глубина до кристаллического фундамента под станциями составляет 205-390 м; под некоторыми станциями мощность четвертичных и современных отложений достигала 10-20 м. Одна станция была неподвижной, а местоположение других менялось с целью составления разрезов вдоль профилей по данным МОВЗ.

За время наблюдений всеми или одной-двумя станциями зарегистрировано более 70 далеких землетрясений ( $\Delta \geq 20^\circ$ ) и более 100 взрывов с карьеров и шахт ЭССР и Ленинградской области. Все близкие взрывы ( $\Delta < 100$  км) легко диагностируются по наличию интенсивных диспергирующих поверхностных волн, аналогичных описанным в [8]. Распознавание взрывов осуществлялось на основе опыта работ ВСЕГЕИ с аналогичной аппаратурой в других районах СССР [9, 10]. Для интервала  $\Delta = 20 \div 100$  км составлен годограф  $t_{S-P}$  взрывов, который с точностью ± (0,1-0,2) с совпал с годографом для Южной Карелии [9].

Основные параметры и гипоцентры афтершоков определены способом засечек по Южно-Карельскому годографу (табл. 1). Для обоих афтершоков найдены значения  $V_P/V_S$  различными способами [11] и по формуле

$$V_P/V_S = \frac{t_{S-P}}{t_P - t_0} + 1. \quad (1)$$

Как видно из табл. 2, сходимость значений  $V_P/V_S$  вполне удовлетворительная. Далее вычислялись длительность колебаний и преобладающая частота записи в соответствии с [12]. При этом было получено для землетрясения 8.XI, что преобладающая частота  $P$ -волн равна 10-20 с, а  $S$ -волн — 10-12 с; длительность колебаний составляет  $26 \pm 5$  с. Для землетрясения 22.XI эти параметры равны соответственно 10-20, 8-10 и  $17 \pm 5$  с. Как видно, афтершоки имеют близкие коор-

<sup>1</sup> В проведении наблюдений и интерпретации материалов участвовали сотрудники ВСЕГЕИ Н.А. Афанасьева, Л.В. Белов, Н.К. Булин, В.В. Васильев, А.В. Волков, В.Н. Воробьев, Н.Я. Григорьева, В.Г. Забелин, Ю.П. Кропачев, Ю.А. Проняева, Ю.А. Семин, Е.И. Эртлис, а также сотрудник Института геологии АН ЭССР М.И. Пазасу и начальник партии Комлексной экспедиции УГ при СМ-ЭССР В.К. Петерсэль.

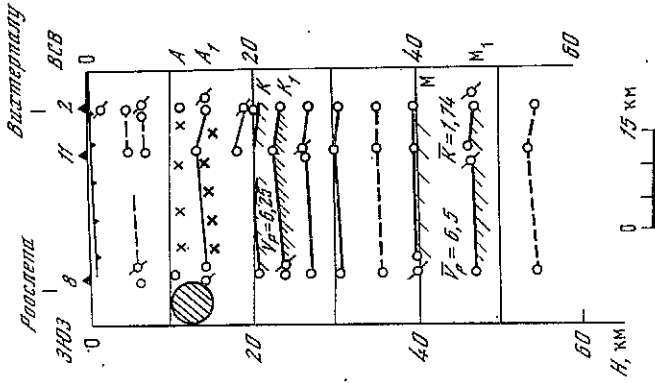


Рис. 2. Сейсмический разрез земной коры вдоль побережья против о-ва Осмусаар по наблюдениям обменных волн  $PS$  от далеких землетрясений и промышленных взрывов

1 — сейсмическая станция и ее номер; 2 — среднее положение отметок глубин по волнам  $PS$  землетрясений; 3 — то же, по промышленным взрывам; 4 — сейсмические границы — горизонты обмена ( $A$  — границы  $A$  и  $A_1$  в "транзитном" слое;  $B$  — границы в "базальтовом" слое;  $B$  — поверхность Мохоровичича  $M$  и границы в магнитной  $M_1$ ); 5 — проекция гипотенузы афтершока 22.XI.1976; 6 — принятые при построении границы значения средней скорости  $V_p$  волн  $P$  ( $км/с$ ) и параметра  $K = V_p/V_S$

его афтершоков представляется в следующем виде (рис. 2). Мощность земной коры до  $M$ , по уточненным данным, равна 39–40 км. Сделанные ранее [14] определения, давшие толщину коры до 46–47 км, относятся не к горизонту  $M$ , а к очень сильной сейсмической границе  $M$  в верхней части мантии. Самыми четкими границами обмена являются горизонты  $A$  ( $H = 9 \div 11$  км) и  $A_1$  ( $H = 13 \div 16$  км) в "транзитном" слое, горизонты в "базальтовом" слое на глубинах 23–25 и 30–32 км и граница  $M$ . К уровню горизонтов  $A$  и  $A_1$  приурочены нижние кромки намагниченных тел [15] и особые точки, характерные для контактных поверхностей по данным вертикального градиента силы тяжести [16].

Попытаемся оценить упругие свойства пород в зоне гипотенузы. Как показано Т.П. Гринем [17] на материалах среднеазиатских землетрясений, для интервала ~300 км значения  $V_p$  на годографе первых вступлений соответствуют значениям истинной (границной) скорости на уровне очага корового землетрясения. Для афтершока 8.XI получили  $V_p = 6,5$  км/с и  $V_S = 3,65$  км/с, для афтершока 22.XI  $V_p = 6,65$  км/с и  $V_S = 3,7$  км/с. Определим коэффициент Пуассона  $\sigma$ :

$$\sigma = (V_p^2 - 2V_S^2) / [2(V_p^2 - V_S^2)] \quad (2)$$

который равен соответственно 0,272 и 0,275. Таким образом, афтершоки и основная толчок Осмусаарского землетрясения произошли, по-видимому, в высокоскоростной и высокопропной среде в средней части транзитного слоя, в непосредственной близости от сейсмического горизонта  $A$ , к уровню которого приурочено изменение упругих и магнитных свойств, а также плотности горных пород.

Опыт применения аппаратуры АСС-3 для инструментального выявления афтершоков землетрясения с  $M = 4,7$  указывает на целесообразность постановки таких работ в будущем. При этом необходимо использовать до десяти станций, располагая их на удаленных до 50–100 км.

Анализ карты изосейст Осмусаарского землетрясения, а также макросейсмических и инструментальных данных его афтершоков позволяет за координаты эпицентра основного землетрясения и его афтершоков принять  $\varphi = 59,3^\circ N$ ,  $\lambda = 23,5^\circ E$ ; глубину очага  $h = 13 \div 15$  км;  $M = 4,75$ .

Так как зона "живущих" разломов, с которой связан очаг землетрясения, протягивается через район о-ва Осмусаар в северо-восточном направлении и обладает большим коэффициентом затухания ( $S > 6$ ), то распространение сейсмической энергии экранируется в юго-восточном и восточном направлениях, и это определяет асимметрию изосейст [18] (см. рис. 1). Вторая узкая зона с большим коэффициентом затухания прослеживается параллельно первой приблизительно вдоль

р. Пярну. На остальной территории Эстонии коэффициент затухания чрезвычайно мал и соответствует консолидированным частям земной коры в других районах Русской платформы ( $S = 2$ ). Очаг Осмусаарского землетрясения лежит, вероятно, на пересечении выявленной выше "живущей" зоны разломов северо-восточного направления и зоны разломов широтного простирания, протягивающейся вдоль северного побережья Эстонии и пересекающей первую зону в районе о-ва Осмусаар.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оперативный сейсмологический бюллетень. М.: Междувед. геофиз. ком., 1976, № 30.
2. Лобур Э., Сильдеез Х. О разрывных нарушениях кристаллического фундамента Эстонии. — Изв. АН СССР. Химия, геология, 1973, 22, № 1.
3. Якубовский О.В. Уточненная карта вертикальных движений земной коры побережья Балтийского моря. — В кн.: Современные движения земной коры. Тарту, 1973, № 5.
4. Желнин Г.А. Результаты изучения современных движений Прибалтики. — В кн.: Современные движения земной коры. Тарту, 1973, № 5.
5. Bath M. An earthquake catalogue for the years 1891–1950. Stockholm, 1956.
6. Аняньин И.В. Связь сейсмичности Русской платформы с современными тектоническими движениями. — В кн.: Современные движения земной коры. Тарту, 1968, № 3.
7. Можженко А.Н. Аппаратура магнитной записи для регистрации землетрясений и удаленных взрывов. — Изв. АН ТССР. Сер. физ.-техн., хим. и геол. наук, 1961, № 3.
8. Булин Н.К., Саваренский Е.Ф. О короткопериодных поверхностных сейсмических волнах. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1961, № 6.
9. Булин Н.К., Афанасьева Н.А., Проньева Е.А. Профильные сейсмологические исследования в южной части Балтийского шита. — Прикл. геофизика. "Недра", 1972, вып. 69.
10. Эргалис Е.И. Сейсмичность южной Якутии и Амурской области в июне–сентябре 1968 года. — В кн.: Вопросы сейсмичности Сибири. Новосибирск, СО АН СССР, 1972, т. 2.
11. Славина Л.В. Методика и результаты изучения  $V_p/V_S$  в фокальной зоне Камчатки. — В кн.: Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976.
12. Кузнецова К.П., Алтерман Ж.Я., Шейбин Н.В., Штейнберг В.В. Афтершоки после действия и афтершоки развития очаговой зоны Дагестанского землетрясения. — В кн.: Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976.
13. Булин Н.К. Опыт построения глубинных сейсмических разрезов по наблюдениям обменных проходящих волн. — Труды ВСЕГЕИ. Нов. сер., 1976, 225.
14. Булин Н.К. Глубинное строение Северо-Западной Эстонии по данным MOV3. — Сов. геол., 1978, № 5.
15. Булина Л.В. Характерные черты распределения нижних кромки намагниченных тел на территории СССР. — В кн.: Магнитные аномалии земных глубин. Киев: Наукова думка, 1976.
16. Козлова Е.Ф., Патрушева В.А. Методика и результаты интерпретации гравиметрических материалов для изучения глубинного геологического строения Русской плиты. — Развед. геол., 1976, вып. 72.
17. Грин Т.П. Интерпретация годографа и строение земной коры восточной части Средней Азии. Деп. № 248–76, 1976.
18. Аняньин И.В. Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977.