

СЕЙСМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ НА ЛАДОГЕ

АССИНОВСКАЯ Б.А.

Заведующая сектором сейсмологии ЛПРГ ГАО РАН, belaa@gao.spb.ru

ОВСОВ М.К.

Научный сотрудник ЛПРГ ГАО РАН, mkovsov@mail.ru

КАРПИНСКИЙ В.В.

Ведущий инженер ГС РАН, karp@geo.phys.spb.ru

МЕХРЮШЕВ Д.Ю.

Заместитель директора ГС РАН, dmeh@gspas.ru



Ключевые слова: сейсмическая активность, сеймотектоника, сейсмические события, землетрясения, акустические события, макросейсмические описания, микросейсмы, микроземлетрясения, слабознергетические микроявления, высокочастотные стоячие волны.

Аннотация: в статье описаны разнообразные сейсмические явления в Ладожском озере и проанализирована их природа. Проведенные исследования базировались на макросейсмических материалах о сейсмических событиях начала XX века и на данных современных инструментальных наблюдений.

С июня 2006 года на мысе Никоновский острова Валаам функционирует постоянная сейсмическая станция короткопериодного типа. На сейсмограммах этой станции было выявлено массовое присутствие высокочастотных импульсных сигналов, появление которых, возможно, инициируется трещинами в массиве горных пород, возникающими под воздействием водных волн. Были получены оценки очаговых характеристик этих микрособытий.

Key words: seismic activity, seismotectonics, seismic events, earthquakes, acoustic events, macroseismic descriptions, microseisms, microearthquakes, low-energy microphenomena, high-frequency standing waves.

Abstract: the article describes various seismic events in the Lake Ladoga and analyzes their nature. The studies were based on macroseismic materials on seismic events of the beginning of the 20-th century and on data of the modern instrumental observations.

Since June 2006 a permanent short-period seismic station has been operating on the Cape Nikon of the Valaam Island. Mass presence of high-frequency impulse signals was revealed on the seismograms of the station. The signals may be initiated by cracks in the massif of rocks arising under the influence of water waves. The focal characteristics of those microevents were estimated.

Сейсмическая активность Ладожского региона невысока даже по сравнению с другими районами Фенноскандии. Тем не менее уровень сейсмической опасности здесь должен быть исследован с большой степенью детальности, прежде всего по причине близости такого густонаселенного мегаполиса, как Санкт-Петербург. В связи с этим в течение последнего десятилетия авторами настоящей статьи в разных аспектах изучались сейсмичность и сеймотектоника данного региона. Так, в специализированных архивах и литературных источниках авторами были найдены, а затем обработаны сведения об исторических землетрясениях Ладоги и Приладожья, в результате чего удалось составить сводку сейсмоявлений начала XX века, насчитывающую более 150 событий. Часть этих материалов вместе с данными о землетрясениях инструментального периода рассматривается в представленном ниже обзоре.

В 2006 году, осознавая важность проведения сейсмических исследований вокруг г. Санкт-Петербурга, Геофизическая служба РАН организовала в регионе инструментальные сейсмические наблюдения на постоянной основе — на о. Валаам и в г. Выборге были установлены сейсмические станции.

Геология и геоморфология Ладожского региона

Ладожская структура маркирует юго-восточное окончание надрегиональной Ладожско-Ботнической разломной зоны — области сочленения двух разновозрастных блоков (архейско-протерозойского и свекофенского) земной коры Фенноскандинавского щита. Она расположена в северной части котловины Ладожского озера и приурочена к одноименному прогибу, осложняющему юго-восточный склон щита и сложенному осадочно-вулканогенными и интрузивными породами. Данный прогиб сформировался в свекофенский тектонический этап нижнего протерозоя. Вследствие своей продолжительной геологической истории он имеет сложное внутреннее устройство. Позже в осевой части прогиба сформировался грабен, сложенный осадочно-вулканогенной толщей, мощность которой колеблется от 200 до 1000 м [4].

В пределах Ладожской структуры отмечены многочисленные разрывные нарушения, расчленяющие ее на систему параллельных горстов и грабенов северо-западного простирания.

Новейшая активность нарушений подтверждается морфологически (Давыдова и др., 1998), а также по распределению мощности и по нарушениям покрова четвертичных отложений в акватории озера.

Тектонические движения имеют место и в настоящее время. Исследователями обнаружено также большое число палеосейсмодеформаций возрастом от 1 до 10 тыс. лет [4].

С разломной тектоникой, а также с влиянием последнего оледенения (10–25 тыс. лет назад) связана морфология дна Ладоги. В северной части отмечается шхерный тип берегов с перепадами глубин до 150 м, картируются вытянутые в северо-западном направлении и субшироко впадины с заметными контрастами глубин (Ладожское озеро. Атлас, 2002).

Сейсмичность Ладожского региона

Землетрясения Ладожского региона представлены в различных каталогах и базах данных. При этом сейсмические события изучены с разной степенью детальности.

К настоящему времени имеются данные о 21 землетрясении (рис. 1), из которых 16 исторических событий с интенсивностью в эпицентре в 3–4 балла про-

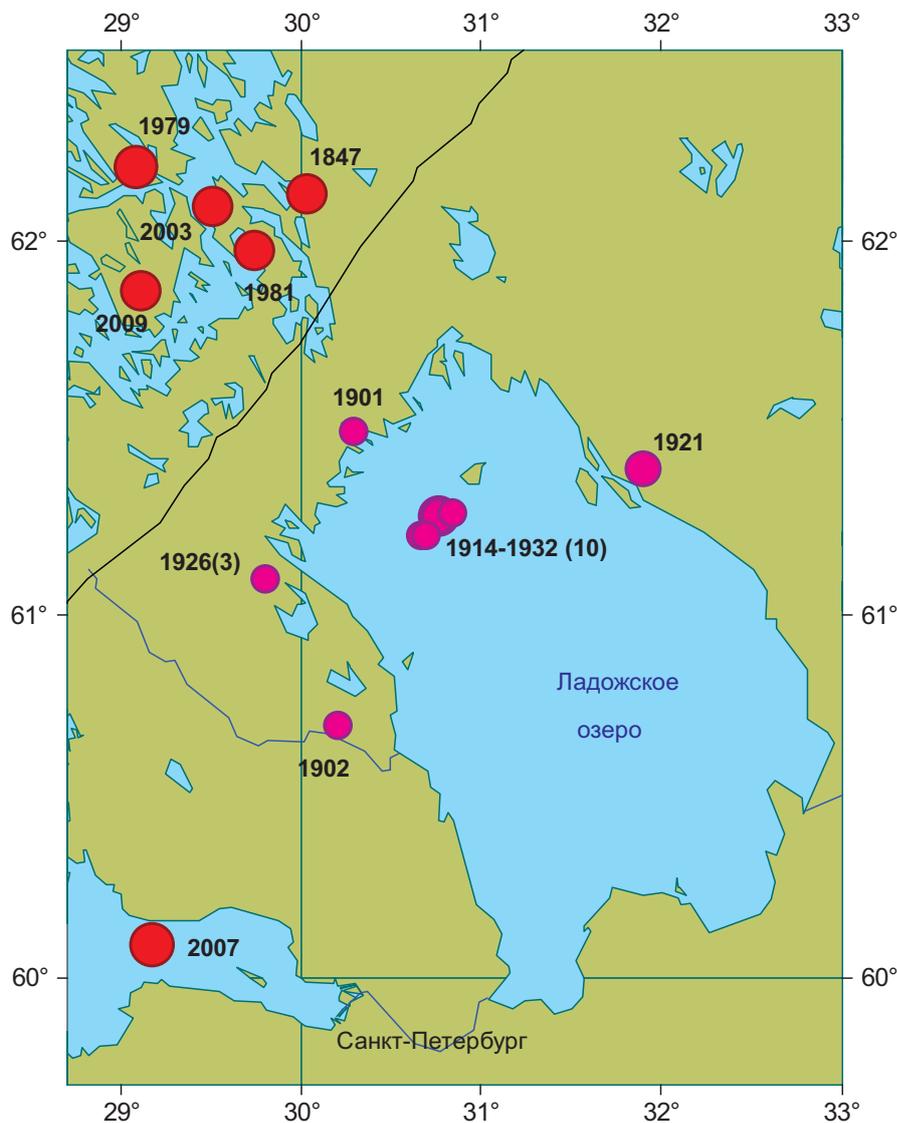


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Ладожского региона. Эпицентры землетрясений обозначены кружками: малиновыми — исторического периода наблюдений, красными — инструментального. Магнитуды событий находятся в интервале 1,7–2,9. Размер кружка пропорционален магнитуде, цифрами показан год возникновения, в скобках — число событий из одного эпицентра

изошли с 1847 по 1932 год. 10 событий образуют Валаамскую группу слабых землетрясений, исследованную авторами. Их эпицентры концентрируются в центре северной части Ладожского озера. Остальные 6 землетрясений (1901–1926 гг.) возникли на периферии Ладожской структуры. Первоисточником информации о них является каталог финского сейсмолога Х. Ренквиста (на финском и шведском языках). Авторы впервые перевели на русский язык макросейсмические описания из этого каталога, изучение которых позволило, например, исключить предполагаемый морозобойный характер возникновения землетрясений 1926 года, а также получить дополнительную информацию о событиях 1901 и 1902 годов.

В период с 1979 по 2009 год в районе Ладожского озера были инструментально зарегистрированы 4 землетрясения с магнитудами, равными 2,3–2,6, и с глубиной очагов 5–10 км. В основном эти

события происходили на финской территории, но вблизи границы с Россией.

Далее к северо-западу Ладожско-Ботническая структура сейсмически более активна — там известны землетрясения с магнитудами до 4,8.

Изучение геологических данных показало, что эпицентры всех описанных землетрясений приурочены к Ладожским грабенообразующим разломам.

Почти полное отсутствие землетрясений в российской части Ладожского региона в течение инструментального периода связано по большей части с коротким интервалом собственных стационарных сейсмических наблюдений. Так, например, сразу после установки сейсмической станции на Валааме в июне 2006 года было зарегистрировано несколько мелкофокусных сейсмических событий, ощущавшихся в юго-восточной части острова (2–3 балла). К сожалению, они не были локализованы. Кроме того, 11 июля 2007 года санкт-



Рис. 2. Первый ладожский сейсмолог

петербургская сеть станций зарегистрировала землетрясение с магнитудой, равной 2,0, из восточной части Финского залива.

Рассмотрим некоторые землетрясения Ладоги более подробно. Самым сильным событием в регионе следует считать изученное А.А. Никоновым [5] Восточно-Ладожское землетрясение, произошедшее в 21 ч 00 мин. 30 ноября 1921 года. Его эпицентр располагался у поселка Салми (между поселками Киркойки и Мансиля). Интенсивность в эпицентре составила 6 баллов, магнитуда оказалась равной 4,0 при глубине очага около 8 км. Поле макросейсмических сотрясений было вытянуто вдоль восточного борта Ладожского озера,

причем изосейста 6 баллов имела максимальный размер 12 км. Очаг события считается приуроченным к Восточно-Ладожскому глубинному разлому северо-западного простирания позднепротерозойского возраста, установленному по геологическим данным. Непосредственно в районе очага исследователями была обнаружена система уступов высотой 15–25 м и крутизной 30°. Их морфологические признаки (выраженность в рельефе и выдержанность линейных форм обращенного к Ладоге борта северо-западного простирания) указывают на связь их возникновения с «молодой» тектоникой — оживлением указанного выше древнего разлома. Новейшие и современные зоны дробления по простиранию этого нарушения обнаружены и далее к северу.

Валаамская зона

Многие работы авторов настоящей публикации в последние годы были посвящены сбору и анализу первоисточников исторических данных о Валаамских сейсмических явлениях XX века.

Первое описание необычных явлений на Ладоге в виде подземных гулов, бурлений воды и содроганий почвы имеется в письме г. Пелликка (1890 года) Х. Ренквисту. С 1911 года такие явления наблюдались монахами Валаамского монастыря.

В 1916 году Постоянной сейсмической комиссией Российской академии наук на о. Валаам были организованы планомерные визуальные (макросейсмические) наблюдения, которые про-

должались многие годы. Наблюдателем и автором записей был монах Валаамского монастыря Иувиан (в миру И.П. Красноперов). Он вел исследования до 1939 года, то есть до того времени, когда все монахи покинули остров и поселились в Финляндии, в Новом Валааме.

Результаты этих наблюдений частично сохранились и были обнаружены авторами в различных архивах. Анализ полученных материалов показал, что с 1915 по 1924 год специальные наблюдения за явлениями сейсмического характера практически непрерывно проводились на о. Валаам, а с 1926 по 1928 год — на о. Воссинойнсаари (Тихвинском). Также имеются интервалы времени, когда наблюдений не было совсем или явления не фиксировались.

По имеющимся у авторов описаниям, происходившие в рассматриваемом регионе сейсмические события делятся на «ощущаемые» (когда наблюдатели ощущали сотрясения — таких событий мало) и «слышимые» (когда землетрясения проявлялись в виде ударов, грохота, гула и пр. — их на порядок больше). При этом в документах подчеркивается «подземный» характер этих звуковых явлений и часто указывается направление прихода звуковых волн, а также описывается их интенсивность и длительность. Есть указания, что они ощущались на открытом воздухе, а не внутри помещения, отдельными наблюдателями или многими людьми, днем или ночью.

Авторская база данных насчитывает в настоящее время 149 событий, из них 10 ощутимых (рис. 3) были локализованы, остальные были идентифицированы по звуковым проявлениям. В сводке авторов приводятся макросейсмические описания событий по первоисточникам, а также по возможности их основные параметры — местоположение и энергетические характеристики. Интенсивность в эпицентрах составляла 2–4 балла. Глубины очагов были приняты равными 3–5 км. Соответственно магнитуды, определенные по соотношениям «магнитуда — балльность», составили 1–3 ед. при удалениях до 20 км.

Приведем примеры некоторых из этих событий.

Землетрясения 15 и 17 января 1926 года. Первое событие описывается в первоисточнике так: «Как мною уже сообщалось, 15 января сего года здесь (на о. Тихвинский, или Воссинойнсаари. — Авт.) были наблюдаемы два удара подземных гулов...» Это же явление ощущалось в центре Ладоги в виде гулов, сильных колебаний, треска и оседания льда. О событии 17 января 1926 года наблюдатель пишет: «Явления гулов на Тихвинском сопровождалось сотрясением почвы, ощущаемым на острове Мигорка, расположенном в 8 км от Тихвинского острова к северу...» Интенсивность в эпицентре была оценена в

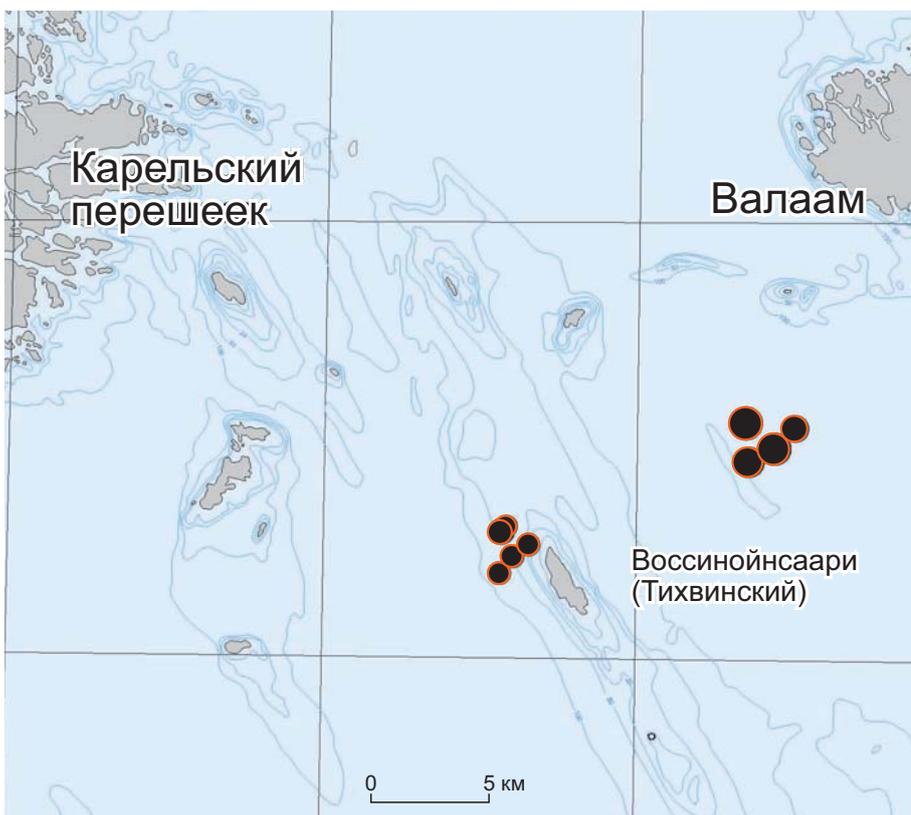


Рис. 3. Эпицентры ощутимых землетрясений (черные кружки) с магнитудами 1,9–2,9

4 балла при глубине источника 5 км, значение магнитуды составило 2,3.

Землетрясения 23 января 1927 года. Эти события были описаны следующим образом: «Тихвинский остров. Ясно и определенно был ощущаем подземный толчок, произведенный плавно в вертикальном направлении. Ничего не могу сказать, было ли распространено явление на соседних островах Ягорка, Ялай, Валаам... Толчок повторился. Был несколько сильнее и мгновенно сопровождался разрывом ледяного покрова озера, вызвавшим оглушительный треск наподобие орудийного выстрела...» В описании указывается местоположение разрыва, его направление и размеры. Учитывая характер толчков и разрывов во льду, авторы данной статьи считают, что эти два ощутимых сейсмических толчка были приурочены к одному эпицентру. Приведенные в описании данные позволяют предположить, что наблюдатель различал землетрясения и ледовые явления.

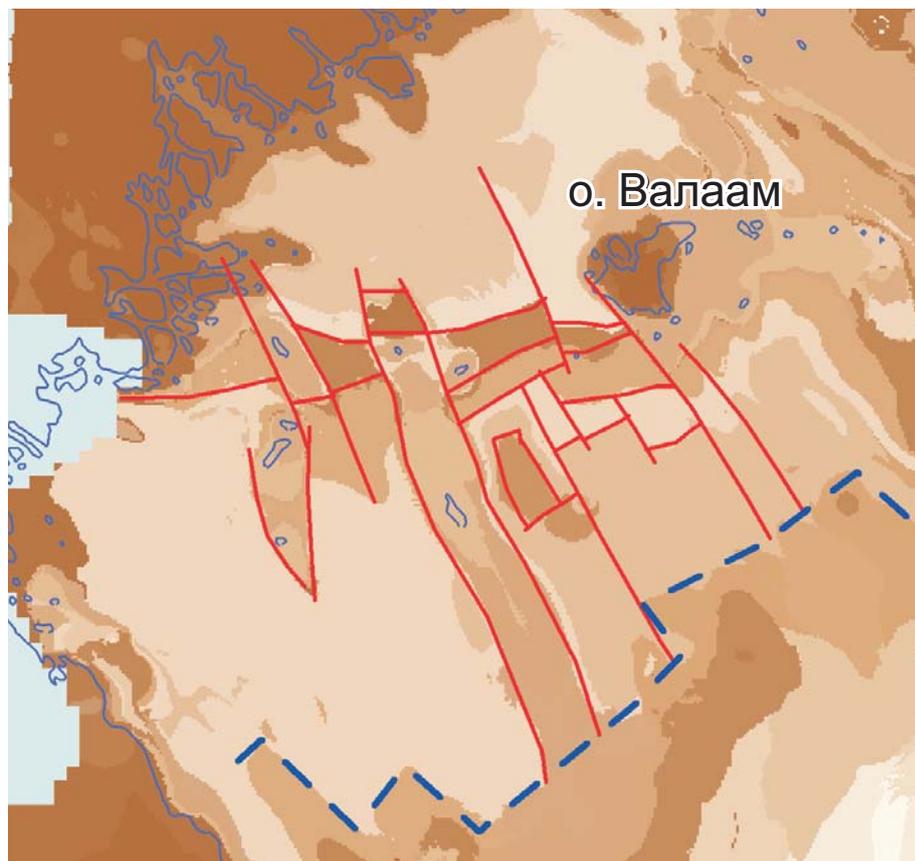
По макросейсмическим данным, в Ладожском озере имеются две очаговые зоны. Первая из них расположена посередине между островами Валаам и Воссинойнсаари (к ней достаточно достоверно приурочены события 15 и 17 января 1926 года и, по всей видимости, землетрясения 1914 и 1932 годов). Вторая зона, вероятно, находится у северного берега о. Воссинойнсаари (здесь имели место 5 событий 1927 года).

Детальный структурный анализ, проведенный М.К. Овсовым, позволил получить представление о строении фундамента в описываемом районе, который почти повсеместно перекрыт чехлом осадочных отложений. На рис. 4 можно увидеть, что кристаллический фундамент в районе возникновения сейсмических событий имеет мелкоблоковую структуру. Широтно ориентированная система блоков протягивается от Валаама к Карельскому берегу. Геологически она представляет собой сопряжение многочисленных непротяженных вертикально падающих разломов субширотного и северо-западного простирания, образование которых связано с внедрением рифейских интрузий габбро-граносиенитов, выявленных А.В. Амантовым.

Зоны сейсмической активности приурочены к областям нарушений максимальной плотности на юго-восточном борту депрессии, расположенной вблизи Валаама и в районе поднятия Воссинойнсаари.

Кроме ощутимых землетрясений в первоисточниках описаны многочисленные и разнообразные акустические события. Их можно считать «сейсмическим откликом» на разнообразные геодинамические процессы в земной коре Ладожского грабена.

Рисунки 1 и 3 позволяют констатировать, что в последние 150 лет в Ладожском регионе присутствует слабая,



— предполагаемые тектонические нарушения
— граница Северо-Ладожской структурной зоны

Рис. 4. Фрагмент карты классов севера Ладожского региона составлена по методике структурного анализа гравимагнитных и батиметрических данных. Из полученной пятиуровневой структуры показан только пятый, самый последний уровень. Оттенками коричневого цвета обозначены классы — блоки, характеризующиеся определенным набором признаков. Большое количество классов (более 100) свидетельствует о высокой дезинтеграции верхней коры в этом районе

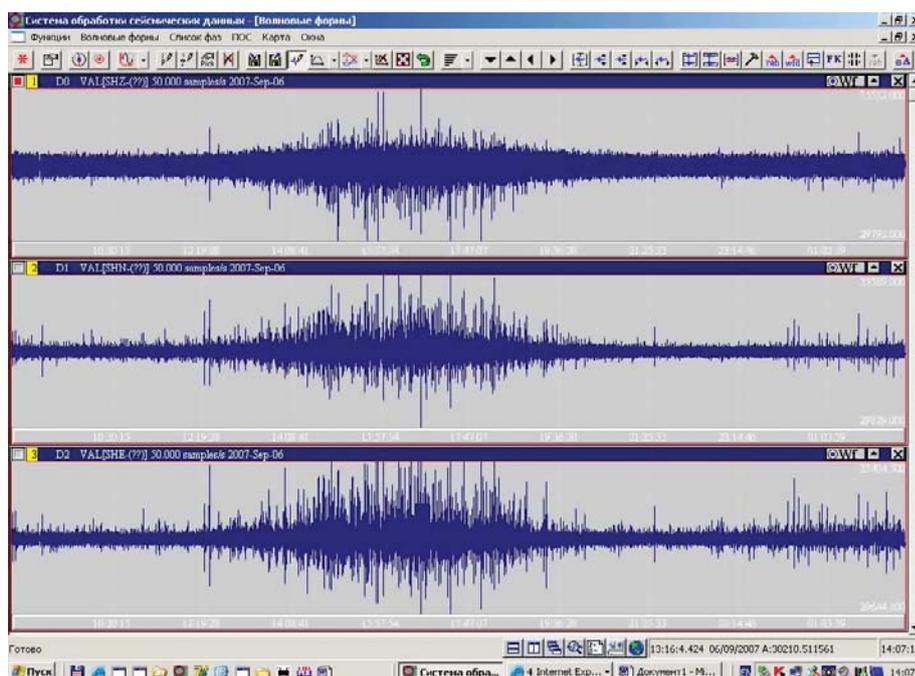


Рис. 5. «Буря микросейсм» — южная (слева) и северная (справа) — и локальные события 6-7 сентября 2007 года (б) в сжатом виде (показано 19 часов записи)

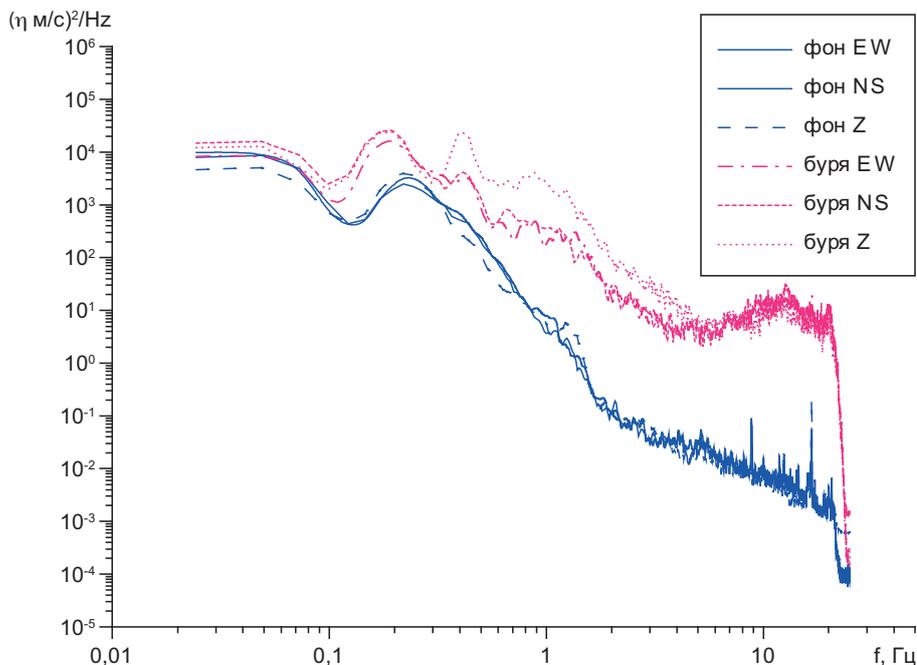


Рис. 6. Спектры мощности фона микросейсм 5 сентября 2007 года в 8 ч 27 мин. и бури 6 сентября 2007 года в 16 ч 29 мин. по компонентам Z, NS, EW сейсмической станции Валаам

но устойчивая сейсмическая активность (которая несколько усиливается в 2000-х годах). Эта сейсмичность, как и положено, тектонически обусловлена — она маркирует «живые» фрагменты Ладожских грабенообразующих тектонических нарушений.

Некоторые особенности сейсмических записей станции Валаам

В июне 2006 года на Никоновском мысе на юго-западе о. Валаам (рис. 9) в подземном бункере (горизонтальной выработке в кристаллических породах) на глубине 3 м была установлена трехкомпонентная сейсмическая станция

регионального типа (регистратор SDAS и сейсмометры S-13). Рабочий частотный диапазон сейсморегистрирующих каналов станции в 2006–2007 годах находился в интервале 1–17 Гц. Благодаря удачному расположению, скальному основанию и отсутствию техногенного шума наблюдения на сейсмической станции Валаам оказались высокоэффективными в части регистрации полезной сейсмической информации (региональных и удаленных землетрясений, а также многочисленных промышленных взрывов).

В то же время расположение станции на берегу такого крупного водоема, каким является Ладожское озеро, предопределило характерные особенности

сейсмических записей в микросейсмической области. Некоторые из них свойственны всем береговым станциям, но есть и уникальные, ранее нигде не описанные.

Микросейсм, регистрируемые станцией, в «тихое» время, как и повсюду, проявляются в виде обычного фона, но иногда фиксируются в виде «бури» (рис. 5). Наиболее интенсивные и продолжительные (до нескольких суток) «бури микросейсм» в северной части Ладожского озера связаны с прохождением теплых или холодных атмосферных фронтов и с резкой сменой направления ветра, а следовательно, и волнения (с южного или юго-восточного на северное или северо-западное, и наоборот). Так называемые «северные бури» в районе мыса Никоновский менее интенсивны и менее продолжительны (правая часть рис. 4), что связано с закрытостью района с севера и, наоборот, с его открытостью южным ветрам. Литературные данные свидетельствуют о гораздо большей интенсивности волнения в открытой воде.

Сравнение с мировыми данными показывает, что средний уровень фона в терминах спектра мощности колебаний в интервале 1–15 Гц составляет на Валааме 10^{-1} $(\eta\text{ м/с})^2/\text{Гц}$ в спокойные периоды, что ниже мирового среднего уровня, равного 10 $(\eta\text{ м/с})^2/\text{Гц}$. В «шумные» периоды эти значения составляют 10^2 и 10^3 $(\eta\text{ м/с})^2/\text{Гц}$ соответственно, то есть уровень сейсмического шума на Валааме ниже мирового примерно на порядок. Спектр (рис. 6), в общем, имеет стандартный вид. Два максимума в низкочастотной части имеют океаническое происхождение.

Неординарным является некоторое повышение уровня фона на вертикальной компоненте по сравнению с горизонтальными в интервале частот 0,4–5 Гц. Причем этот факт отмечается только во время бурь. При этом фоновые спектры полностью совпадают. Причина этого явления, вероятно, связана со спецификой положения станции.

Пиковые формы в высокочастотной части спектра означают резонансные явления, обусловленные как аппаратными эффектами на краю полосы пропускания, так и, возможно, физическими процессами.

Самой интересной особенностью сейсмограмм со станции Валаам является большое количество необычных вступлений, которые постоянно осложняют уже описанные «бури микросейсм».

События имеют импульсную форму. Сопоставление их волновых форм свидетельствует об уникальности событий и, в большинстве случаев, об их удивительной идентичности. Визуально импульсы представляют собой огромный массив очень часто повторяющихся слабознергетических микроявлений с очень простой волновой формой, со-

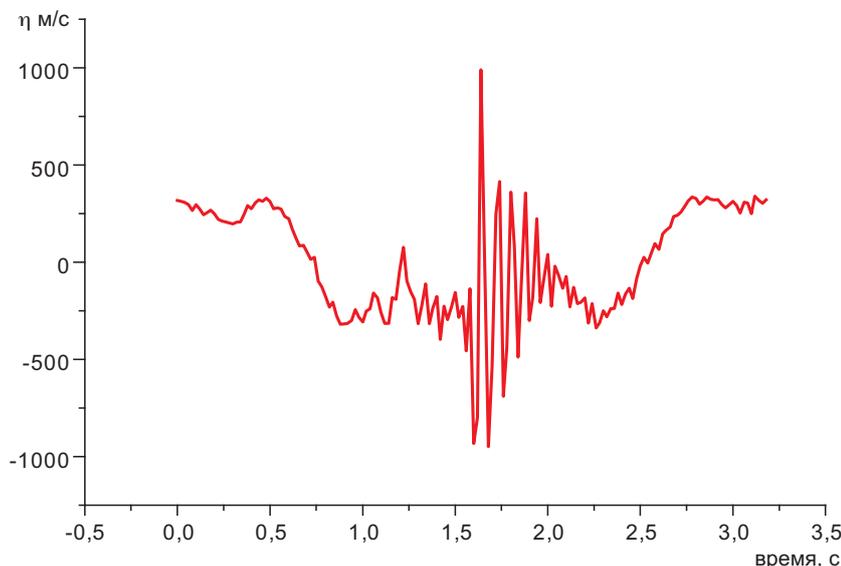


Рис. 7. Запись типичного локального сейсмического события (z-компонента) 6 сентября 2007 в 16 ч 32 мин.

стоящей, исходя из анализа поляризации, из очень слабого первого вступления (Р-волны) и четко выраженной группы поверхностных волн Лява или Релея. Часто первое вступление отсутствует, но выделяется группа волн, напоминающая латинскую букву N. Количество импульсов на сейсмограммах настолько большое, что не поддается рутинной обработке в ручном режиме. Возникает вопрос: какова их природа?

На рис. 7 можно увидеть типичное единичное вступление в 16 ч 32 мин. 4 с 6 сентября 2007 года в единицах скорости движения грунта (η /с). Диапазон преобладающих частот в рассматриваемом событии составляет 3–17 Гц. Максимум спектра приходится на 13 Гц.

Статистический анализ массы событий 2006–2007 годов дает значение средневзвешенной частоты максимальной фазы сигналов, также равное 13 Гц (при разбросе от 5 до 21 Гц). Среднее значение амплитуд наиболее сильных событий в выборке 2006 года составило 184 η /с, а в выборке 2007 года — 367 η /с. Средняя длительность импульса по выборке 2006 года составила 0,5 с (при разбросе 0,34–0,78 с и 6–7 пиках на событие), а по выборке 2007 года — 0,4 с (при разбросе 0,23–0,89 с и 5 пиках на событие).

Скорость возникновения событий равна в среднем 1 событию в минуту, но 30% явлений происходят с интервалами 2,5–11 мин. Распределение по амплитуде близко к нормальному (рис. 8).

Локализация источников событий

Судя по записям событий, расстояния до источников очень малы. Расчеты показывают, что источники описываемых событий расположены на расстояниях 100–300 м от станции Валаам. В некоторых случаях удалось определить азимуты на эпицентры и осуществить локализацию (см. рис. 9).

Оценки расстояний независимо подтверждаются результатами полевых исследований, проведенных летом 2007 года, когда параллельно с сейсмической аппаратурой на станции Валаам работал микробарограф MARTEC, способный регистрировать звуковые сигналы. Рабочий диапазон прибора по усилению находился в интервале 0–5 гПа (1 мВ/гПа), по частоте 0,02–20 Гц.

15 июня 2007 года регистрация осуществлялась во время штормовой погоды (падение атмосферного давления составило 5 мм рт. ст.), что позволило получить на станции Валаам синхронные записи сейсмических и акустических волн. По этим записям расстояние до эпицентра оказалось равным 180–190 м.

Из рис. 9 следует, что микрособытия формируются в заливе Пунайненлахти. Их эпицентры располагаются к юго-за-

паду от станции в азимутах 175–185°, 212° и 240°, вероятно, маркируя одну из подводных зон трещиноватости массива скальных пород мыса Никоновский.

На временных станциях, установленных вокруг о. Валаам на расстояниях от постоянной сейсмостанции до 8 км (на островах Ханхипаси, или Маячный, Яичный и Дубровка) и работавших в тот же период времени, импульсные события не фиксировались, хотя общее усиление фона, обусловленное приходом атмосферного фронта, имело место. Следует отметить, что нигде станции не располагались на такой гипсометрической высоте и на таком отвесном берегу, как станция Валаам.

Спектральный анализ цифровых записей позволил оценить параметры микроочагов некоторых описываемых событий. Сейсмическая энергия приведенного на рис. 6 события оказалась равной 36,6 Дж, магнитуда $M_w = -2$, радиус микроочага $R \approx 4$ см, если источник является сдвиговой трещиной, и $R \approx 1$ см, если источник является трещиной растяжения.

Какие есть аналоги?

Микроземлетрясения в части очаговых параметров исследованы в огромном количестве работ. Результаты изучения импульсных тектонических микроколебаний в близком диапазоне энергий (10^{-8} – 10^{-2} Дж) по специальной методике с применением апертурных сейсмических групп изложены, например, в работах Института динамики гео-

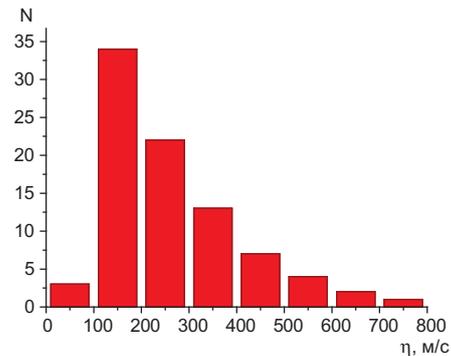


Рис. 8. Распределение событий (N = 86) 5 ноября 2006 года по амплитуде

сфер. В качестве источника импульсов здесь рассматриваются релаксационные процессы в массивах горных пород, находящихся в стесненных условиях. Дополнительно можно указать, что, например, в Финляндии при изучении горных ударов было зарегистрировано 30 тыс. событий на глубинах 1,2–1,4 км с эпицентральных расстояний 25–450 м, которые имели сейсмический момент 5×10^6 – 5×10^{10} н·м.

W.L. Ellsworth и K. Imanishi регистрировали микроземлетрясения в нескольких скважинах на разломе Сан-Андреас вблизи Паркфилда (Калифорния), в центре кальдеры Long Valley. Самые слабые события при этом имели $M_w = -3,5$ и размеры очага <1 м. Среднее смещение по разрывам для этих микроземлетрясений определялось на уровне 100 мкм.

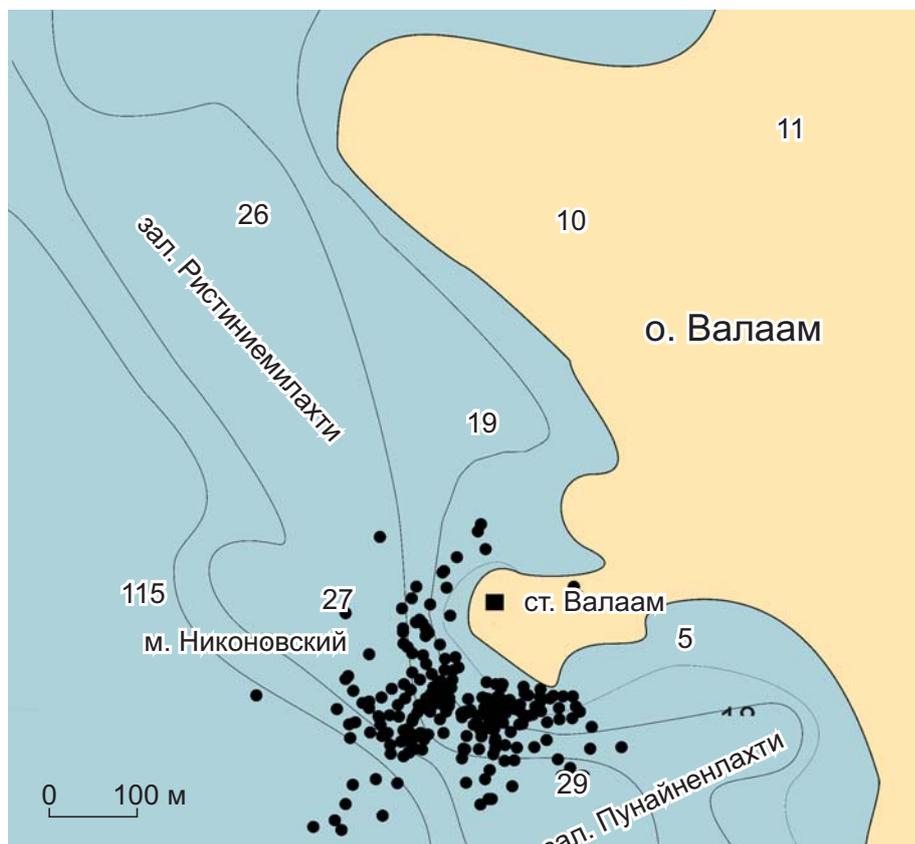


Рис. 9. 242 события 5–11 ноября 2006 года

Описываемые нами сейсмические события по энергетическому уровню соответствуют самым слабым горным ударам или микроземлетрясениям, хотя, вероятно, инициируются другими, нетектоническими силами.

Обсуждение результатов

Локальные микросейсмы образуются в донных отложениях залива Пунайненлахти под воздействием стоячих волн. Известно, что первичные океанические (и не только) микросейсмы генерируются только на мелководье в прибрежных регионах. Они имеют тот же период T , что и водяные волны (для океана $T \approx 10-16$ с). Возникновение вторичных микросейсм объясняют интерференцией волн с равными периодами, распространяющимися в противоположных направлениях. В процессе суперпозиции образуются стоячие гравитационные волны с половинным периодом.

Локализация источников микросейсм с использованием широкополосных сейсмических групп показала, что зарождение вторичных микросейсм происходит в разных районах Северной Атлантики, в том числе вблизи берегов Северной Норвегии. Также было установлено, что ландшафт берегов в Северной Норвегии, характеризующийся наличием длинных и глубоких фьордов, может быть причиной образования стоячих волн. В работе описаны различные формы берегов, некоторые из которых похожи на геометрию мыса Никоновский о. Валаам.

В Ладожском озере период первичных водяных волн ветрового происхождения составляет 3–5 с. Соответственно период вторичных волн будет 1,5–2,5 с. В заливе Пунайненлахти полукруглой конфигурации возможно возникновение суперпозиции волн, отраженных от крутого подводного склона с образованием высокочастотных стоячих волн. Этот процесс можно смоделировать и даже найти его подобие на реальной сейсмограмме.

Однако понятно, что все описанные выше первичные, вторичные, средне- и короткопериодные микросейсмы имеют континуальный характер, тогда как мы имеем дело с огромными массивами импульсных явлений, которые возникают каждый раз при прохождении атмосферных фронтов (особенно южного направления) на фоне микросейсм непрерывного характера.

Можно предположить, что описываемые явления — это высокочастотная реакция трещиноватого массива горных пород, слагающего крутой береговой уступ, на давление прямых (отраженных) водяных волн и их разрушение, причем максимальным будет давление волн разрушения. Количественно эту величину можно получить с использованием формул В. Шулейкина,



Рис. 10. О. Валаам. Мыс Никоновский

хорошо известных в физике моря, если принять следующие характеристики водяных волн, развивающихся на поверхности Ладожского озера при прохождении атмосферных фронтов: высота волны 2,6 м, длина волны 2,3 м при скорости ветра 6–9 м/с. Тогда давление водной волны разрушения будет равно 0,1662 МПа.

Как указано выше, одно сейсмическое событие может выделять энергию ~37 Дж. При радиусе очага 0,01–0,04 м плотность энергии в этом объеме породы окажется 2–9 МПа, то есть нужны десятки волн, чтобы инициировать сейсмический процесс.

Сравним эти значения с известными прочностными характеристиками горных пород. Объемная плотность потенциальной энергии при растяжении находится в интервале 0,36–2,5 МПа, а при сдвиге этот параметр оценивается величиной 5 МПа. Полученные в про-

цессе исследований результаты имеют тот же порядок, что и данные расчетные значения.

Можно вспомнить, что только за одну бурю на ограниченной площади (у юго-западного берега мыса Никоновский) возникают и регистрируются сотни сейсмических импульсов, которые генерируются развивающейся совокупностью растущих трещин отрыва и сдвига. Считается, что при ударах волны о крутой скалистый берег обрушивающаяся вода сжимает воздух в порах и трещинах породы — и он работает, как взрывчатка. С течением времени в крутом береговом обрыве возникает так называемая волноприбойная ниша (Короновский и др.). Когда она становится большой, нависающая над ней часть берега обрушивается и обрыв отступает, а измельченный обломочный материал образует вблизи берега подводную террасу (рис. 10). 📍

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ассиновская Б.А. Сейсмические события на Ладоге в XX веке // Известия РГО. 2005. Т. 137. Вып. 4. С. 70–76.
2. Ассиновская Б.А., Новожилова Т.В. К вопросу о степени сейсмической опасности Санкт-Петербургского региона // Известия ГАО РАН. 2002. Вып. 216. С. 394–401.
3. Ассиновская Б.А., Овсов М.К. Детальная тектоническая структура северной части Ладожского грабена: Материалы XIV Международной конференции «Связь поверхностных структур земной коры с глубинными». Часть I. Петрозаводск: КРНЦ РАН, 2008. С. 29–30.
4. Глубинное строение и сейсмичность Карелии / под ред. Н.В. Шарова. Петрозаводск: Изд-во Карельского центра РАН, 2004. 352 с.
5. Никонов А.А. Восточно-Ладожское землетрясение 30 ноября 1921 года // Физика Земли. 2005. № 7. С. 1–5.
6. Новожилова Т.В., Ассиновская Б.А. Новые данные из архивов Б.Б. Голицына // Известия ГАО РАН. 2002. Вып. 216. С. 609–618.