

ISSN 1997-8669

1/2011

ECOPICK



Необычное землетрясение 31 июля 2010 года на Ладожском озере

An unusual earthquake on July 31, 2010 in the Ladoga Lake

АССИНОВСКАЯ Б.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург,
belaa@gao.spb.ru

КАРПИНСКИЙ В.В.

Геофизическая служба РАН, г. Обнинск Калужской обл.
НЕДОШИВИН С.А.

Геофизическая служба РАН, г. Обнинск Калужской обл.

ASSINOVSKAYA B.A.

The Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of the RAS, St. Petersburg,
belaa@gao.spb.ru

KARPINSKY V.V.

Geophysical Survey of the RAS, Obninsk, Kaluga region
NEDOSHIVIN S.A.

Geophysical Survey of the RAS, Obninsk, Kaluga region

Ключевые слова: землетрясение; рой землетрясений; магнитуда; сейсмическая активность; макросейсмические проявления; ураган; сейша.

Аннотация: в статье описана уникальная последовательность 32 землетрясений наноуровня, зарегистрированных постоянно действующей сейсмической станцией «Валаам». Очаговая зона располагалась на Ладожском озере на удалении от станции не более 2 км. Самым сильным оказалось землетрясение 31 июля 2010 года, произошедшее в 18:44 GMT с магнитудой $M_L = -0,8$, которое макросейсмически ощущалось в юго-западной части острова Валаам. Оно явилось следствием нарушения гидродинамического равновесия в верхних горизонтах земной коры Ладожского грабена у мыса Никоновский, вызванного воздействием сейши, которая, в свою очередь, возникла под влиянием мощного урагана, пронесшегося над Ладожским озером в ночь с 29 на 30 июля 2010 года. Данное сейсмическое явление подтвердило потенциальную сейсмическую активность юго-восточного окончания Ладожско-Ботнической зоны и тектоническую природу Ладожских макросейсмических событий начала XX века, описанных авторами в предыдущих публикациях.

Введение

В предыдущей статье [3] авторы описали сейсмические события Ладожского региона: тектонические землетрясения и массовые микросейсмические импульсные события, возникновение которых предположительно связано с воздействием водяных волн на скальный береговой массив. Авторы отмечали, что последнее явление уникально (в литературе не было найдено аналогов).

Сейсмическое событие 31 июля 2010 года, как будет показано ниже, также является достаточно необычным. Это землетрясение произошло в 18:44 GMT на Ладожском озере вблизи мыса Красный (Никоновский) на юго-западе острова Валаам. Несмотря на малую магнитуду ($M \approx 1$), оно было инструментально зарегистрировано и ощущалось макросейсмически. Это событие можно считать первым землетрясением в этом районе, записанным специализированной сейсмической аппаратурой. Кроме того, есть основания полагать, что указанная сейсмическая активность проявилась не только одним толчком, но и роем наноземлетрясений (32 событий с $M_L = -0,8 \div -2,6$). Возникновение землетрясений в центральной части Ладожского грабена подтвердило прогноз долговременной сейсмической опасности в данном регионе, сделанный ранее на основании исторических данных.

Инструментальные данные

Сейсмические наблюдения на постоянной основе ведутся в Санкт-Петербургском регионе с 2006 года. На острове Валаам функционирует трехкомпонентная сейсмическая станция регионального типа [4].

31 июля 2010 года в 18:44 GMT станция «Валаам» записала землетрясение.

Одно событие, предшествовавшее этому толчку, и более трех десятков, возникших после него, составили вместе с ним сейсмический рой. На рисунке 1 представлены сейсмограммы основного землетрясения, из которых очевидно, что данное сейсмическое событие представляло собой импульс продолжительностью 3 с, с достаточно четко выраженнымными P- и S-волнами. Разница (S-P) со-

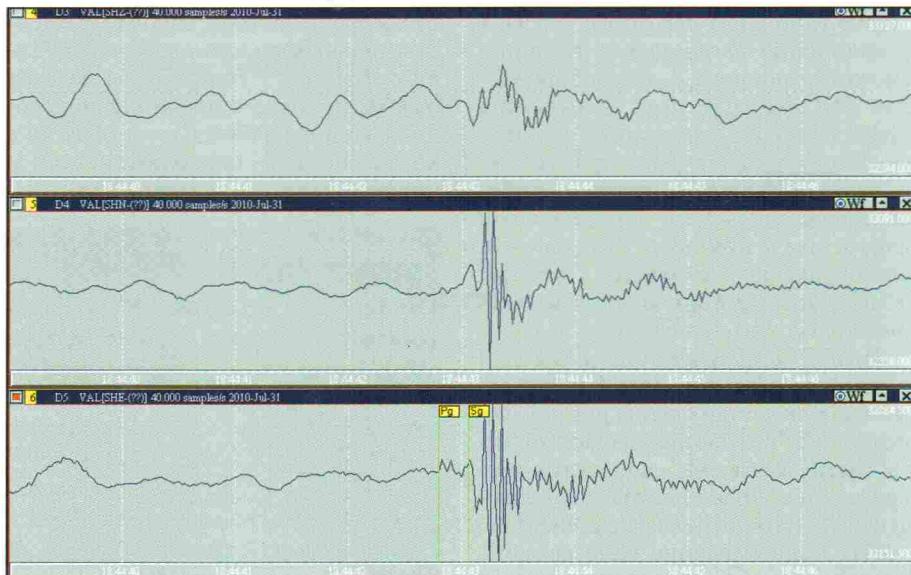


Рис. 1. Запись землетрясения в 18:44 GMT 31 июля 2010 года сейсмической станцией «Валаам» (компоненты записи сверху вниз — вертикальная, север-юг, восток-запад)

ставила около 0,3 с. Следует, правда, указать на факт неполной адекватности сейсмической аппаратуры станции «Валаам» такому близкому и слабому событию, поэтому спектрально оно, видимо, записано не полностью.

Локализация очага данного землетрясения, а также нескольких других, для которых были определимы основные фазы, была проведена по азимуту на эпицентр и расстоянию с использованием регионального годографа NW RUSSIA программы WSG (рис. 2). Использовалась фиксированная глубина очага 1 км. Скоростная модель для очень малых расстояний нам неизвестна, однако перебор скоростей пробега продольных и поперечных волн исходя из известного литологического состава пород привел к величинам эпицентральных расстояний, равным 2–3 км.

Оценка инструментальной магнитуды M_L проводилась путем симуляции на записях сейсмограммы прибора WOOD-ANDERSEN с последующим применением nomogramмы M. Joswig [14] из программы SNET, любезно предоставленной сотрудниками Пермского горного института. Вторым способом определения магнитуды был просто расчет по формуле: $M_L = \sigma(\Delta) + LgA/T$ (где $\sigma(\Delta)$ — поправка, зависящая от гипоцентрального расстояния; A — амплитуда максимальной фазы волны Lg в мк (микронах); T — период волны в с). Первый член формулы пренебрежимо мал в связи с близостью источника и не учитывался. Оба метода дали сходные оценки: $M_L = -0,8$ для главного толчка и $M_L = -1,0 \div -2,6$ для остальных. Распределение событий по магнитуде, частотам и во времени показано ниже в виде сжатой сейсмограммы (рис. 3), гистограммы (рис. 4) и спектрограммы (рис. 5).

Сейсмический процесс начался с возникновения форшока с $M_L = -1,75$ в 18:33, далее следовало основное событие роя, некоторое ослабление в районе 19 часов и проявление активности с 01 до 03 часов 1 августа в виде последовательности землетрясений с магнитудами $-1,6 \div -2,6$.

Сейсмический момент, рассчитанный с использованием амплитуды гладкой части спектра смещения самого сильного толчка ($U_o = 1,00E - 0,8$ м), равен $M_o = 4,27E + 0,8$ Н·м. Тогда магнитуда $M_w = -0,2$, если $M_w = 2/3 \log M_o - 6,0$ [12].

Макросейсмика

Авторы решили подробно описать в общем-то стандартную макросейсмiku рассматриваемого землетрясения из тех соображений, что инструментальная магнитуда этого события настолько мала, что по всем канонам оно не должно было оказаться ощущимых воздействий.

Из 13 наблюдателей, коими оказались сотрудники учебно-научной стан-

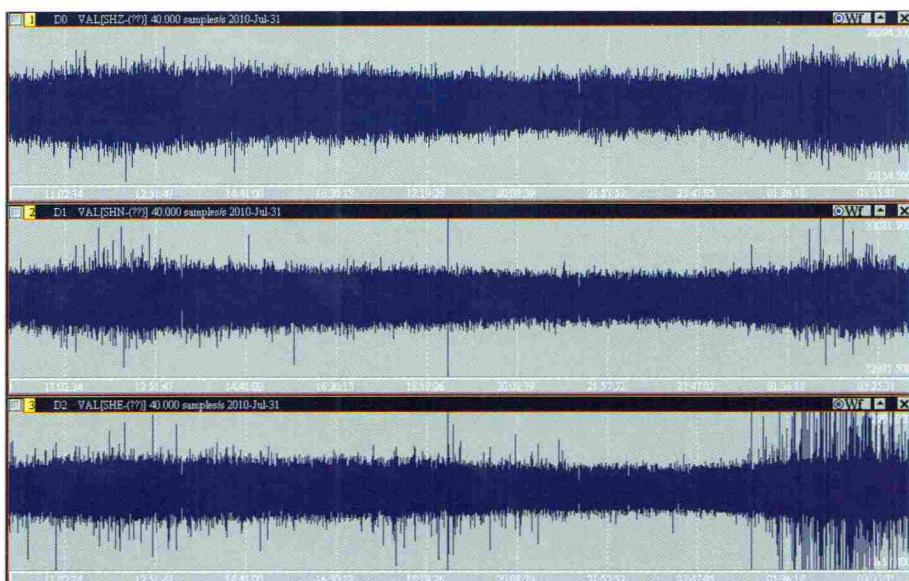


Рис. 3. «Сжатая» сейсмограмма станции «Валаам» (с 11:02 GMT 31 июля до 03:25 GMT 1 августа 2010 г.). На составляющей EW в рамке — рой землетрясений 31 июля. Слева и справа — бури микросейсм, осложненные множеством микрособытий, описанных в работе [3]

ции РГГМУ, 6 человек находились в помещениях (легких одноэтажных строениях), остальные были под открытым небом. С макросейсмической точки зрения событие проявилось в виде толчка и сотрясений, вибраций пола и мебели, ощущаемых всеми людьми внутри строений, падения отдельных

предметов, легкой паники (отдельные люди выбежали на улицу). Под открытым небом сотрясения не ощущались, однако все наблюдатели описывают звуковые явления в виде удара, хлопка из-под земли, раскаты грома, взрыва «с длинным шлейфом», шума упавшего предмета, пришедших с юго-запада от

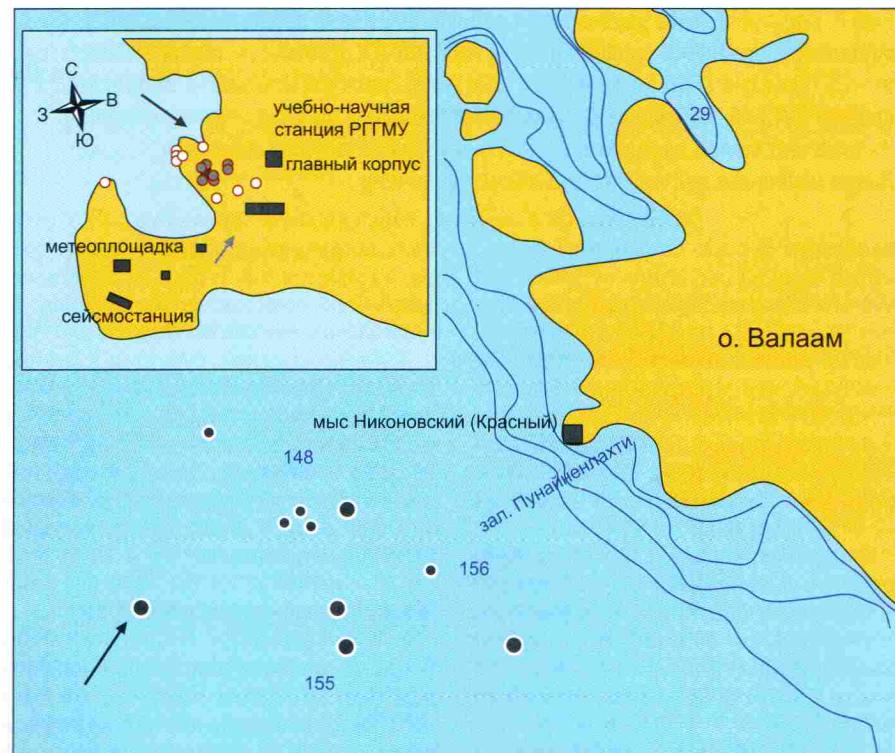


Рис. 2. Землетрясения с 18:33 по 23:17 GMT 31 июля 2010 г. с $M_L = -0,8 \div -2,6$ в районе мыса Никоновский. Самое сильное событие показано стрелкой. Средний азимут $234,7^\circ$, среднее расстояние $2,19$ км. На врезке — макросейсмическая схема. На схеме представлены: серыми кружками — проявления с интенсивностью 3–4 балла; белыми кружками — проявления с интенсивностью 2 балла; светло-серой стрелкой — направление прихода звука; черной стрелкой — место геодинамических проявлений

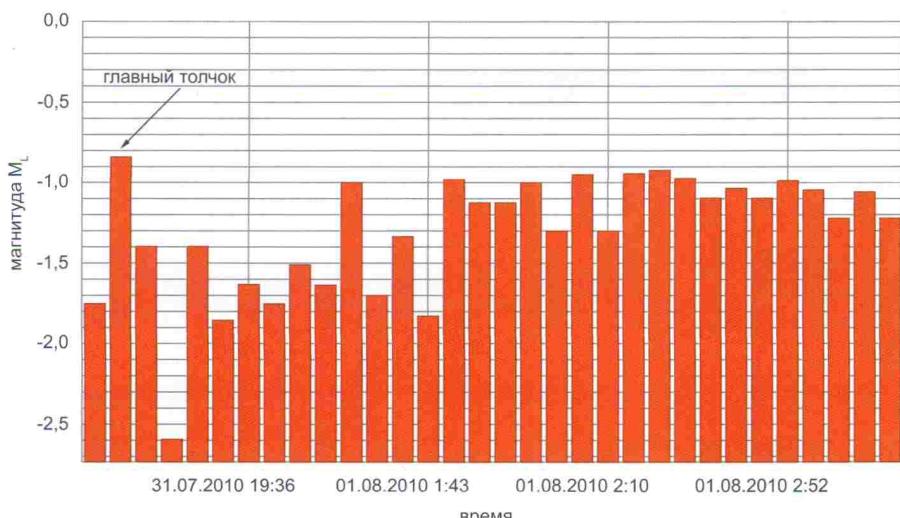


Рис. 4. Распределение наиболее сильных толчков 31 июля – 1 августа 2010 г. по магнитуде M_L . Стрелкой показан главный толчок в 18:44

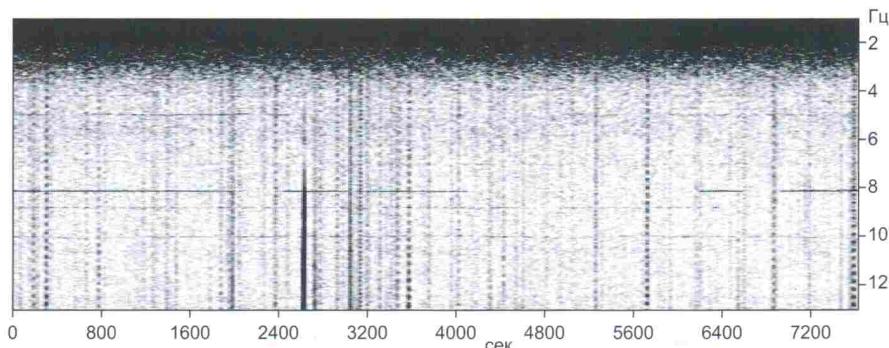


Рис. 5. Спектрограмма двухчасовой записи до и после землетрясения, изображенного здесь черной полосой на 2500-й с. Плотность записи изменяется от -1,5 (светлый фон) до 1 (черный цвет) спектральной плотности. Использован фильтр 5-13 Гц. Черные пунктирные вертикальные полосы – землетрясения. Их отличает малая продолжительность и узкий частотный диапазон. После основного толчка частота полос увеличена

скалистого берега, со стороны маяка. Только один наблюдатель отметил, что звук пришел с востока, со стороны острова. Некоторым людям было страшно даже на улице, они написали: «Все сразу поняли, что это природное явление крупного масштаба, оно было похоже на начало конца света». Все приведенные наблюдения четко соответствуют уровню макросейсмической интенсивности 3–4 балла МСК-64 (EMS-98).

В поселке в районе Свято-Преображенского монастыря (4,7 км к северу от мыса Никоновский) землетрясение не ощущалось, однако наблюдатель, находившийся примерно посередине между мысом и поселком, отчетливо слышал гул.

На соседней метеостанции по ряду причин описание события получить не удалось. Ближайшие скиты (Красный, Желтый), расположенные примерно в 1,5 км к северо-западу, не имеют постоянного населения. Таким образом, размеры области ощущимости землетрясения могут быть определены весьма приблизительно исходя из того, что очаг землетрясения по инструменталь-

ным данным находился в пределах озера, на расстоянии 2–3 км от берега, а в узкой береговой полосе интенсивность сотрясений достигала 4 баллов.

Можно отметить еще одно важное и необычное обстоятельство: самое сильное сейсмическое событие роя предварял гидродинамический предвестник в виде воронки на поверхности воды, внезапно появившейся вблизи берега, куда оказались втянутыми некоторые предметы.

Макросейсмическая магнитуда

Очевидно, что данных для уверененной оценки макросейсмической магнитуды M не вполне достаточно, однако примерные оценки можно получить, используя следующие известные соотношения.

$$1. I = 1,5M - 3,5lg\sqrt{(D^2 + H^2)} + 3, [8]$$

где I — интенсивность сотрясений в баллах по шкале МСК-64; D — эпицентральное расстояние в км, H — глубина очага в км.

При $D=2,6$ км, $H \approx 1$ км, $I=3-4$ получаем значение магнитуды $M=1,4$, что представляется завышенным.

$$2. I = 1,36M - 2,71lg\sqrt{(D^2 + H^2)} + 3,36, [9]$$

При $D=2,6$ км, $H \approx 1$ км, $I=3-4$ получаем $M=1,0$.

$$3. M_a = 0,6I_o + 1,78lgH_a - 1,33, [10, 11]$$

где M_a — макросейсмическая магнитуда; I_o — интенсивность сотрясений в баллах в эпицентре по шкале МСК-64, H_a — глубина очага в км.

При $I_o=4$, $H_a \approx 1$ км получаем $M_a=1,1$.

Учитывая, что погрешность определения макросейсмической магнитуды обычно составляет $\pm 0,5$, в нашем случае можно принять ее значение за 1 как наиболее близкое к истине. Расхождение с инструментальной магнитудой можно объяснить достаточной грубостью оценок силы слабых землетрясений по макросейсмическим данным и, возможно, неполной записью сигнала установленной на станции аппаратурой с полосой пропускания 1–13 Гц.

Гидрометеорологическая обстановка

Представляется важным отметить, что описанный рой землетрясений возник спустя два дня после урагана 29 июля 2010 года в северо-западных областях России с центром в Приозерском районе Ленинградской области. На сайте ГУ «Санкт-Петербургский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями» [16] это аномальное природное явление описано следующим образом: «Вечером 29 июля 2010 года после продолжительной аномально жаркой погоды к юго-западным, южным районам Ленинградской области подошел холодный атмосферный фронт. Изначально фронт был ориентирован с севера на юг вдоль 25-го градуса восточной долготы и должен был смещаться на север, северо-запад. Но в течение дня в тыл этого фронта зашел холодный воздух, и фронт стал разворачиваться в широтном направлении. По данным геостационарного спутника в 19:30 МСК (15:30 GMT) на холодном фронте над востоком Новгородской области стало активно увеличиваться яркое облако овальной формы (рис. 6). Наиболее активное развитие этого облака началось с 20:45 МСК (16:45 GMT). Метеорологический радиолокатор показал, что в этом облаке возникли грозы и образовался град. Верхняя граница облака достигла высоты 15 км и более. Максимальные порывы ветра составили 12–14 м/с. В Новгородской области шквал про-

шел через Любытинский и север Маловишерского района, оставил на своем пути значительные разрушения. К 21:45 (17:45 GMT) шквал подошел к южным районам Ленинградской области. В 23:10 МСК (17:10 GMT) он достиг юго-восточной окраины Приозерского района. По характеру разрушений по шкале Бонфорта скорость ветра в это время достигала 28,5–32,6 м/с, а местами (где деревья были вырваны с корнем) 33 м/с и выше. В 00:15 МСК (20:15 GMT) шквал обрушился на п. Сосново и длился там 30 мин., при этом скорость ветра достигала 30 м/с. Далее шквал проследовал на северо-запад, прошел восточнее поселка Лесогорский и покинул территорию Ленинградской области в 01:00 МСК (21:00 GMT).

К сожалению, у нас нет официального описания проявлений данного урагана в Карелии и на Валаамском архипелаге. Однако, судя по рис. 6, «яркое белое пятно» накрыло также Ладожское озеро и соответственно район возникновения землетрясения. Атмосферное давление, измеренное как на метеостанции «Валаам», так и на станциях «Сосново», «Сортавала», «Лодейное поле», было аномально низким в 19–21 ч GMT (23–01 МСК) 29 июля (рис. 7).

Сейша

Описанный выше ураган оказал влияние на уровень воды в Ладожском озере. По сообщениям наблюдателей, находившихся на острове Никольский, расположенному вблизи северного берега острова Валаам, вечером 30 июля (точное время суток неизвестно) «вода в озере в виде длиннопериодной волны ушла от берега, далее вернулась». Где точно находились наблюдатели, в какую сторону ушла вода, когда она вернулась, какова была ее высота, неизвестно. Можно предположить, что высота ее, вероятно, была меньше высоты берега (8 м). Согласно другим визуальным наблюдениям, эта волна имела достаточную силу, чтобы пройти через внутренние протоки острова Валаам и сдвинуть подтопленные бревна на некоторое расстояние. Данные гидродинамические явления почти наверняка связаны с явлениями возникновения сейши.

Сейши, как известно, это быстрые колебания уровня воды, связанные с изменением атмосферного давления над озером. По закону «обратного барометра» понижение давления на 1 мбар вызывает повышение уровня на 1 см. Во время сейши колеблется вся водная масса озера до самого дна, качается наподобие маятника, стремясь вернуть себе равновесие, из которого она выведена внешним воздействием. При выходе барического образования с морской акватории на сушу вода также приходит в колебательное движение. Через некоторое время после возникновения сейши их амплитуда уменьшается и колебания

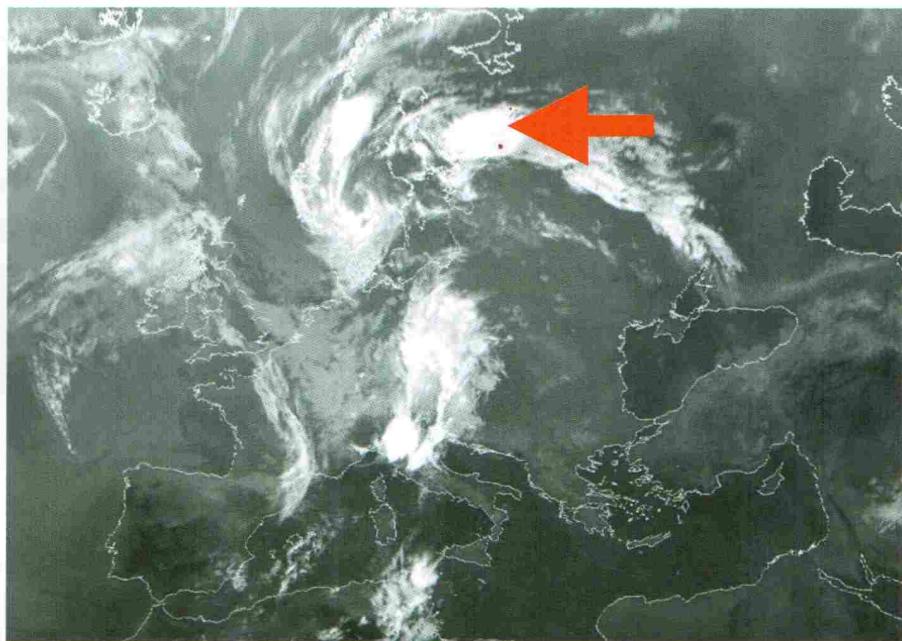


Рис. 6. Снимок с геостационарного спутника в 01:00 МСК (21:00 GMT) 30 июля 2010 года. Красная стрелка указывает на яркое белое пятно – область распространения урагана [16]

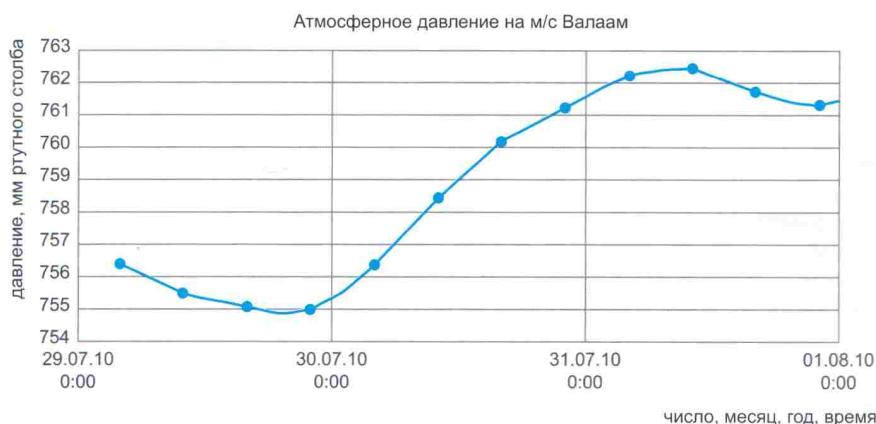


Рис. 7. Распределение атмосферного давления с 20 июля 00:00 по 01 августа 00:00 2010 года

затухают. Время затухания определяется силой трения воды о дно и сильно зависит от глубины водоема и конфигурации берегов. Тем не менее сейши продолжаются длительное время. Конфигурация сейши, число узлов (сейши бывают одноузловые и многоузловые [5]), расстояние между ними зависят от средней глубины бассейна, рельефа дна, наличия бухт и проливов.

Сейши на Ладожском озере изучены достаточно детально [5]. Разность атмосферного давления между Сортавалой и Новой Ладогой иногда превышает 5–6 мбар, что служит причиной довольно сильных ветров вдоль длинной оси озера. Кроме того, циклоны, пересекающие озеро поперек, создают и разность давлений на восточном и западном его берегах (иногда до 10 мбар и более). По данным Т.И. Малининой, основной одиноузловой сейши Ладожского озера является сейша с периодом 5 ч 40 мин., которая возникает вдоль самой длинной оси озера, протянувшейся с северо-за-

пада на юго-восток на 219 км. Узел сейши располагается в 112 км от северного конца озера, а ее амплитуда не превышает 300 мм и довольно быстро уменьшается. Двухузловая продольная сейша Ладоги имеет период 2 ч 11 мин. На озере выражены и сейши с периодами 90 и 60 мин. (вероятно, трехузловая и четырехузловая), в бухтах и заливах — с периодами 16–18 и 10–11 мин. Сейша с периодом 16–18 мин. наблюдается и в открытом озере. Можно предполагать, что сейши с короткими периодами являются многоузловыми.

Вообще на озере наблюдались сейши с девятью различными периодами. Амплитуды сейши относительно невелики — от 3–5 до 28 см.

К настоящему времени мы не обладаем всей полнотой информации о характеристиках сейши, возникшей после урагана 29 июля 2010 года (и это не является задачей данных исследований). Как было сказано выше, замеры атмосферного давления на разных станциях

не выявили различий на берегах Ладоги. Однако, по данным Северо-Западного ЦГМС, весь ураган длился 2,5 ч и, когда он покидал озеро в северо-западном направлении, давление на юге и юго-востоке должно было подняться раньше, чем на северо-западе. Согласно уровнемерным данным по посту «Валаам» аномальные колебательные движения воды (см. рис. 8) начались в момент максимальной фазы урагана, длились более 8 ч, имели период около 4 ч и амплитуду 5 см относительно среднего, что, действительно, соответствует изменению давления в 5 мм рт. ст. (см. рис. 7).

Получается, что явления, описанные наблюдателями, произошли позже. Они соответствуют периоду времени, когда уровень воды пришел (приходил) в исходное состояние. Если рассматривать этот процесс далее, то следует указать на то, что сейсмический процесс начался через сутки после сейши, а на кривой уровня воды Ладожского озера он совпадает по времени с областью резкого спада амплитуды параметра. Нельзя, правда, исключить, что длиннопериодная составляющая на рис. 8 — это систематическое сезонное изменение уровня воды, а указанная градиентная зона случайно совпала по времени с началом сейсмического процесса. В геодинамическом аспекте представляется, что длинная волна, пройдя через весь остров, нарушила гидродинамическое, а следовательно, и гидростатическое равновесие, что, как известно, приводит к возникновению избыточных напряжений, которые в данном случае реализовались в виде серии микроземлетрясений.

Выводы

1. Описанный выше рой землетрясений, зарегистрированный сейсмической аппаратурой, подтвердил потенциальную сейсмическую активность южного окончания Ладожско-Ботнической сейсмогенной зоны, которую авторы настоящей статьи прогнозировали еще 9 лет назад [2]. А констатированное ранее отсутствие землетрясений инструментального периода в российской части Ладожского региона, как и предполагалось, оказалось связанным с коротким интервалом собственных стационарных сейсмических наблюдений.

2. Впервые была установлена связь сейсмических и природных гидродинамических явлений на Ладоге. Интересно отметить, что описанные в предыдущей статье [3] Валаамские микрособытия имеют очень похожие волновые формы. Теперь становится понятным, что описанные одним из авторов исторические сейсмические события начала XX века [1] имели, по всей видимости, ту же гидродинамическую природу.

По мнению авторов, возрастает ценность имеющегося у них макросейсмического каталога этих явлений. Пред-

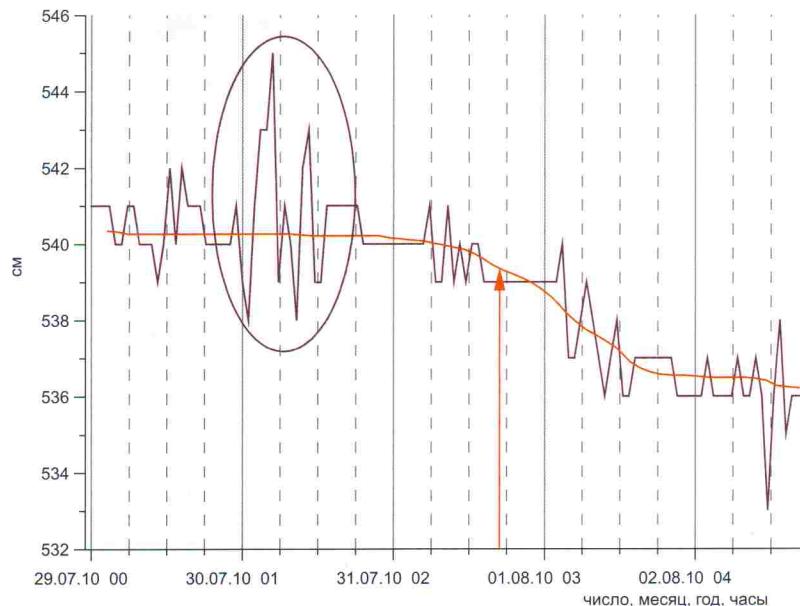


Рис. 8. Ежечасные уровни воды на оз. Ладожское (о. Валаам) по данным самописца (в см над нулем поста, соответствующим 0,00 м БС) с 29 июля 2010 года 00:00 МСК по 2 августа 2010 года 16:00 МСК (по данным Карельского УГМС). Овалом обозначена сейша на озере — период времени до и после 23:00 МСК (19:00 GMT) 29 июля 2010 года. Красная стрелка — момент землетрясения в 18:44 GMT 31 июля 2010 года. Сетка показывает четырехчасовой интервал. Горизонты воды на 20–45 см превышали норму — средние многолетние значения на Ладожском озере [15]

ставляется, что его нужно опубликовать без обработки, как есть, в надежде на то, что источник будет точно локализован в будущем. На данном этапе исследований авторы априори не могли этого сделать по сейсмограммам одной станции, но они планируют осуществить

установку сети станций совместно с СПбГУ следующим летом.

Авторы благодарят студентов и сотрудников РГТМУ за активное участие в сборе макросейсмической информации, А.А. Маловичко и Р.А. Дягилева за помощь в работе, Ю.К. Щукина за ценные советы.

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., Карпинский В.В., Мехрюшев Д.Ю. Сейсмические события на Ладоге // Геориск. 2009. № 3. С. 6–12.
4. Карпинский В.В., Ассиновская Б.А., Горшков В.Л., Иванов В.Ю. Сейсмическая станция «Валаам» // Известия ГАО. 2006. № 218. С. 216–220.
5. Калесник С.В. Ладожское озеро. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. С. 159.
6. Малинина Т.И. Одноузловая продольная сейша Ладожского озера // Элементы режима Ладожского озера. Л.: Наука, 1964. С. 25–33.
7. Новожилова Т.В., Ассиновская Б.А. Новые данные из архивов Б.Б. Голицына // Известия ГАО РАН. 2002. Вып. 216. С. 609–618.
8. Шебалин Н.В. Балльность, магнитуда и глубина очага землетрясений // Землетрясения в СССР. 1961. С. 126–138.
9. Assinovskaya B.A., Nikonorov A.A. Felt Earthquakes of the XX-th century within the eastern Baltic Shield // Abstracts of XXVI General Assembly of the European Seismological Commission (ESC), Tel Aviv, August 23–28, 1998. P. 10.
10. Bath M. An earthquake catalogue for Fennoscandia for the years 1891–1950 // Sveriges Geologiska Undersokning. Arsbok 50. Ser. C. V. 545. Stockholm, Sweden, 1956. 52 p.
11. Bath M. Earthquakes in Sweden 1951–1976 // Sveriges Geologiska Undersokning. Ser. C. V. 750. Stockholm, Sweden, 1979. 79 p.
12. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice / ed. P. Bormann. Potsdam: GeoForschungsZentrum, 2002. 1252 p.
13. Joswig M. Automated Processing of seismograms by SparseNet // Seismological Research Letters. 1999. V. 70. P. 705–711.
14. www.geophys.uni-stuttgart.de/lehre/summerschool/tutorial.pdf.
15. www.kareliameteo.ru/press-center/info/1285749588.html.
16. www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=582.