

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**Научный совет по проблемам
фундаментальной и прикладной
гидрофизики**



№ 3 (5)

2009

**Сборник научных трудов
Издается с 2008 года**

СОДЕРЖАНИЕ

Статьи

<i>Чаликов Д.В.</i> Статистика экстремальных ветровых волн	4
<i>Малинин В.Н., Шевчук О.И.</i> О прогнозе сезонного хода уровня Мирового океана	25
<i>Волженский М.Н., Родионов А.А., Семенов Е.В., Филатов Н.Н., Зимин А.В., Булатов М.Б.</i> Опыт верификации оперативной модели для мониторинга гидрофизических полей Белого моря в 2004-2008 гг.	33
<i>Белов Б.П.</i> Образование турбулентного шума на носовой антенне подводного аппарата	42

Факты и гипотезы

<i>Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н.</i> Цунамиподобные явления в российских внутренних водоемах	52
Поздравляем!	65
Из истории науки	69
Хроника	72
Внимание, конкурс!	75
Правила представления материалов в редакцию	77

CONTENTS

Articles

<i>Chalikov D.V.</i> Statistics of Extreme Wind Waves.....	4
--	---

This paper describes the results of more than 4,000 long-term (up to thousands of peak-wave periods) numerical simulations of nonlinear gravity surface waves performed for investigation of properties and estimation of statistics of extreme («freak») waves. The method of solution of 2-D potential wave's equations based on conformal mapping is applied to the simulation of wave behavior assigned by different initial conditions, defined by JONSWAP and Pierson-Moskowitz spectra. It is shown that nonlinear wave evolution sometimes results in appearance of very big waves. There are no predictors for appearance of extreme waves, however, a height of dimensional waves is proportional to a significant wave height. The initial generation of extreme waves can occur simply as a result of group effects, but in some cases the largest wave suddenly starts to grow. It is followed sometimes by a strong concentration of wave energy around a peak vertical. It is taking place throughout several peak wave periods. It happens to an individual wave in a physical space, no energy exchange with surrounding waves taking place. Probability function for steep waves has been constructed. Such a function can be used for development of operational forecast of freak waves based on a standard forecast.

Key words: surface waves, extreme waves, freak waves.

<i>Malinin V.N., Shevchuk O.I.</i> About Forecast of Seasonal Variations of the Global Sea Level.....	25
---	----

Regularities of seasonal variations of the Global Sea Level (GSL) based on satellite altimeter data for the years 1993–2008 are discussed. Two prediction models of GSL seasonal variations are offered: a deterministic model as the sum of the trend and GSL annual harmonic and an adaptive model of linear increase with additive seasonality. Considered are the results of testing and experiment forecasts of monthly averaged GSL values based on independent data for 2005–2008 period. It is shown that by 2013 GSL may increase 13–14 mm compared to the one in 2009.

Key words: level, altimetry, forecast, adaptive analysis, trends.

<i>Volzhenskij M.N., Rodionov A.A., Semenov E.V., Filatov N.N., Zimin A.V., Bulatov M.B.</i> Experience of Verification of Operative Model of Monitoring of the White Sea in 2004–2008.....	33
---	----

The decision of global operative model of the White sea is compared to ship measurements, the satellite data and level fluctuations at hydrometeorological station "Solovki". The conclusion about satisfactory work of model becomes.

Key words: White sea, system of operative monitoring, temperature, salinity.

<i>Belov B.P.</i> Turbulent Noise on the Submerged Vehicle Nose Antenna	42
---	----

Representations about the mechanism of noise formation in the forward part of the underwater vehicle are considered and an attempt to consider elastic properties of the forward part of the case is accepted by use of model of a wedge. The conclusion about boundary layer thickness pulsations in a zone of laminar-turbulent transition as to the most probable reason for the formation of turbulent noise in a forward part is done.

Key words: antenna, laminar-turbulent transition, noise spectra, wedge diffraction, Green function, boundary impedance noise sources of monopole and dipole types.

Facts and Hypotheses

<i>Didenkulova I.I., Pelinovsky E.N.</i> Tsunami-like Events in Russian Inland Waters	52
---	----

Descriptions and manifestations of tsunami-like events in Russian inland waters (lakes, rivers and water reservoirs) are collected and analyzed. For the time period of 400 years nine such events are found, whereof descriptions of seven events can be categorized as reliable. Data analysis confirms the possibility of tsunami wave generation in all types of inland waters. There is therefore a need to educate the general population about the risk of tsunami generation.

Key words: tsunami, rivers, lakes, water reservoirs, inland waters, Russia.

Факты и гипотезы

УДК 551.46

И.И.Диденкулова¹, Е.Н.Пелиновский¹
dii@hydro.appl.sci-nnov.ru

ЦУНАМИПОДОБНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В РОССИЙСКИХ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ

Собраны описания и упоминания о цунамиподобных явлениях в российских внутренних водоемах: реках, озерах и водохранилищах. За период в 400 лет было найдено девять событий такого рода, из которых семь можно считать достоверными. Собранный материал подтверждает существование риска возникновения цунами и цунамиподобных явлений во всех водных водоемах, а также подтверждает необходимость информирования об этом населения.

Последнее катастрофическое цунами, случившееся 26 декабря 2004 г. в Индийском океане, стало предметом серьезного анализа цунамиопасности для районов, где по существу это явление вообще не рассматривалось как опасное, и службы предупреждения цунами отсутствовали. Говоря о нашей стране, прежде всего вспоминают Дальний Восток, где цунами является относительно частым явлением и, кроме того, развернута служба оповещения о цунами. Существует многочисленная литература с описанием цунами на Тихоокеанском побережье России [1-4]. Исторические данные вкупе с численными расчетами послужили основой для разработки схемы цунами районирования Дальнего Востока [5]. За последние годы на Дальнем Востоке зарегистрированы новые случаи цунами, среди них катастрофическое Шикотанское 5 октября 1994 г. [6-7], которое, по существу, подтвердило обоснованность разработанной схемы цунами районирования. В настоящее время на Дальнем Востоке развернуты работы по поиску следов палеоцунами (сильных цунами в прошлом), и один из авторов (И.Д.) принял участие в одной такой экспедиции на островах Кунашир и Шикотан летом 2005 г. Отметим также, что катастрофическое Индонезийское цунами 2004 г. было зарегистрировано мареографом в Северо-Курильске, что еще раз подтверждает глобальный характер распространения цунами в Мировом океане.

Что касается других районов России, то для них не существует службы оповещения о цунами, и изучение опасности цунами только началось. Прежде всего, отметим более 20 случаев цунами, случившихся в Черном море за весь исторический период [8-11]. Большинство из них носило локальный характер и было инициировано землетрясениями в море. Около 10 случаев слабых цунами известно для Каспийского моря, большая часть которых связана с подводным грязевым вулканизмом [12-15]. Два случая палеоцунами (приблизительно 10 000 лет назад) обнаружены в Балтийском море [16]. Отметим также цунами астероидного происхождения в Баренцевом море [17]. Подчеркнем, что события такого рода могут происходить в любом месте (не обязательно в морях и океанах) и уже происходили в России. Так, 350 млн. лет назад падение астероида в районе Калуги (в то время там было море) привело к возникновению волн

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

© Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н., 2009

цунами [18]. Сейчас волнам цунами астероидного происхождения уделяется значительное внимание [19].

Между тем цунами и цунамиподобные явления случаются не только в морях и океанах, но и в так называемых внутренних водоемах: реках, озерах и водохранилищах. Хорошо известны три сильнейших цунами, вызванных оползнями в итальянских водохранилищах Вайонт (Vajont) и Понтезей (Pontesei) [20]. Одно из событий, произошедшее в 1963 г. и унесшее жизни около 2 000 человек, хорошо описано в литературе, в том числе и на русском языке [21]; высота волны в водохранилище Вайонт достигла 235 м. Отметим, что события такого рода происходили в Альпах и в доисторические времена: так, в озере Люцерн (Lucern) в Швейцарии в результате оползня образовалась волна высотой 3 м [22]. Несколько случаев цунами сейсмического происхождения произошло в озере Кинерет (Израиль) [23]. Резонансные колебания в озере Хебден (Hebden Lake, Montana) продолжительностью 11.5 ч отмечались после землетрясения с магнитудой 7.5 [24]. Потенциальная опасность цунами в озере Тэхое (Tahoe Lake) в Калифорнии-Неваде, возбуждаемых большими землетрясениями, специально отмечается в [25]. Наконец, выделим цунами вулканического происхождения в озерах. Так, в 1305 г. с горы Таравера (Tarawera) в озеро Таравера сошла серия пирокластических потоков, которые вызвали волны цунами, достигающие высот 6-7 м на противоположном берегу озера [26]. В озере Тааль (Taal) на Филиппинах извержение вулкана сгенерировало 5-метровое цунами [27].

Аналогичные события происходили и в России, и первая сводка о них приведена в работах [28-30]. Всего за период 1597-2006 гг. выделено девять событий в различных районах России, так что частота их появления составляет примерно 45-50 лет (за последние 200 лет цунами возникали примерно раз в 25 лет). География цунамиподобных явлений представлена на рис. 1. Семь событий могут рассматриваться как достоверные. Землетрясения и оползни являются равновероятными источниками этих событий (по четыре), и одно событие вызвано извержением вулкана.



Рис. 1. Места наблюдения цунамиподобных явлений на территории России

Цунами сейсмического происхождения. Возникновение волн в водохранилищах, озерах и других внутренних водоемах при сейсмотектонических подвижках дна не вызывает сомнений, и здесь накоплен некоторый наблюдательный материал [23]. Отметим несколько случаев наблюдений цунами сейсмического происхождения в российских водоемах.

Прежде всего упомянем озеро Байкал. Наиболее известный случай произошел 12 января 1862 г. (31 декабря 1861 г. по старому стилю) во время Цаганского землетрясения в районе дельты реки Селенги на юго-восточном берегу; магнитуда этого землетрясения оценивается в 7.1 [31, 32]. Вот как описано это событие в книге [32]: *«Здесь на так называемой Налетовской карге стояло зимовье крестьян, ловивших рыбу на Байкале. Вытягивая сети, рыбаки услышали подо льдом сильный шум, треск, мгновенно их подняло так высоко, что они как бы с горы увидели свое зимовье. Желая найти спасение на привычном убежище, они хотели было бежать туда, но неожиданное зрелище сильно взволнованной суши до того поразило их, что они кинулись далее на байкальский лед, который в то время был еще неподвижен. Едва только успели они отбежать, как волна, поднявшая их, быстро устремилась на берег, снесла зимовье и прошла на две с лишним версты (более 2 км) вглубь земли, уничтожив стоящий на пути лесок и прорвав землю, которая вероятно одновременно опустилась, так что глубина прорыва имеет на 2 аршина воды, да надо льдом высился берег от 1 до 1.5 аршина. Слой растительной земли как бы изорван по берегам этого пролива. Волна по прошествии нескольких минут быстро возвратилась в Байкал, разогнав далеко от берега лед. Лдины в несколько сажень длиною и до 1.5 аршина толщиною отнесены на две версты и покрывают поверхность пролива. Зимовьев нет и следа, женичину, бывшую там, унесло и мертвую затерло между льдами. Проезжавший мимо зимовьев бурят пропал совершенно». «31 декабря валом Байкала прорвало каргу в трех местах, а в других местах перебросило массы льда через эту преграду. Сажень 50 далее по берегу есть еще третий прорыв, имеющий 10 сажень ширины».* Во время этого события, по-видимому, возник гигантский сейсмогенный оползень и огромный участок дельты реки Селенги опустился не менее чем на 5 м, а на его месте образовался залив Провал, площадь которого составила 203 км². Произошедшие изменения зафиксированы на рис.2.

В работе [1] упоминается слабое цунами (амплитуда в несколько десятков см), зарегистрированное лимниграфами при Среднебайкальском землетрясении 29 августа 1959 г. (магнитуда землетрясения $M = 6.5$). Следует отметить, что только в районе Среднего Байкала в год фиксируется более 300 слабых и сильных землетрясений. Район дельты Селенги является одним из наиболее сейсмоактивных в данной области. За последнее столетие в дельте произошло четыре разрушительных землетрясения: уже упомянутое 1862 г. (интенсивность $I = 8-9$ баллов, $M = 7.5$), 1871 г. ($I = 8-9$ баллов, $M = 6.3$), 1903 г. ($I = 8-9$ баллов, $M = 6.7$) и также упомянутое 1959 г. ($I = 9$ баллов, $M = 6.8$) [33]. Совокупность сейсмотектонических данных заставляет предполагать, что на Байкале возможны землетрясения с магнитудами 7.5-8 с повторяемостью в 100-200 лет, что может привести к генерации волн цунами высотой до 1-2 м. Однако расчеты опасности цунами для побережья Байкала пока еще не проводились.

В статье [34] проанализирован карело-финский эпос, из которого следует, что в Карелии (реках и озерах, а также на побережье Белого моря) происходили в прошлом сильные землетрясения (с интенсивностью 7-8 баллов) и, по-видимому, цунами, о чем свидетельствуют следующие строки: *«Чтоб сгребал я волны в кучу, чтобы тростник собрал я вместе по всему побережью моря и нашел утеху в море»,* или *«Тотчас лодка вышла в море, и пошел он чистить море, подметать его течение».* И хотя эта информация весьма неопределенная, но с учетом строительства здесь гидро- и атомных электростанций долговременная опасность цунами для Карелии должна быть изучена.



Рис. 2. Территория, затопленная после землетрясения 12 января 1862 г. [32]: 1 – затопленные площади Цаганской степи; 2 – озера, существовавшие до затопления; 3 – затопленные бурятские улусы; 4 – глубина залива Провал, м

Большинство озер и рек в России находятся в несейсмической зоне. Тем не менее, известны случаи, когда слабые землетрясения все же вызывали цунами. В статье [35] приводится следующее описание подобного явления: «12 сентября 1806 года в 9-ом часу вечера вблизи города Козьмодемьянска на Волге (рис. 3) лейтенантом Балле замечено «нарочитое колебание на воде», происходившее от землетрясения, которое сколько он

заметить мог, началось при ясном небе и тихом ветре от запада к востоку и продолжалось около 5 секунд».

Анализ геологических и исторических данных позволил авторам этой работы сделать оценку параметров землетрясения 1806 г.: магнитуа - 3.7 (глубина очага 5 км), интенсивность 6 баллов. Отметим, что со времени землетрясения в Козьмодемьянске на Средней Волге были зафиксированы еще два землетрясения с магнитудами от 3 до 4: в Елабуге в 1851 г. и в Сокских Ярах в 1914 г. [35], что свидетельствует о необходимости изучения возможных цунами на реке Волге. Случай 1806 г. анализируется в наших работах [29, 36].

Наиболее вероятным механизмом появления наблюдаемых колебаний поверхности воды является известный

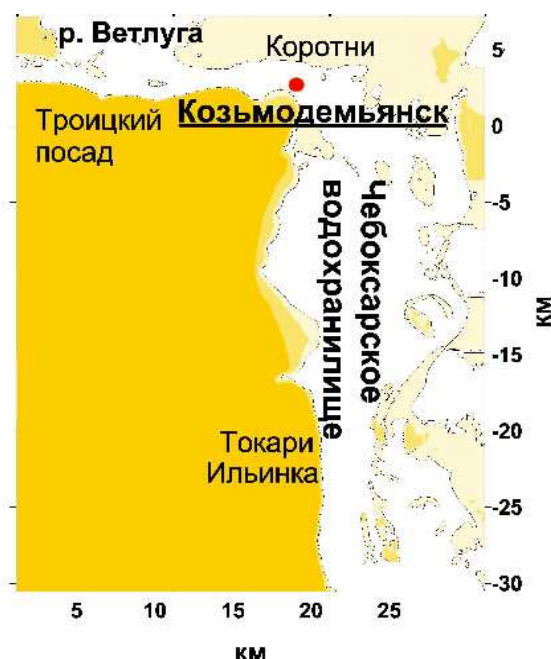


Рис. 3. Положение эпицентра землетрясения 1806 г. на Волге

эффект «моретрясения» над очагом подводного землетрясения [37-38], заключающийся в параметрической генерации волн на воде в осциллирующем поле гравитации. Учитывая, что характерные сейсмические частоты колебаний почвы при близком землетрясении заключены в интервале от 3 до 5 Гц, то характерные частоты параметрически генерируемых на воде волн составляют 1.5 – 2.5 Гц, а длины 20-70 см. Максимальную амплитуду такой волны можно оценить из известного соотношения для крутизны предельной волны Стокса равной 0.143. Отсюда следует, что амплитуда предельной волны на воде меняется в интервале от 3 до 10 см и такая волна может быть замечена наблюдателем. Скорее всего, это и есть то *«нарочитое колебание на воде»*, которое наблюдал во время землетрясения 1806 г. лейтенант Балле. О генерации длинных волн, которые мы обычно отождествляем с цунами, в данном случае не сообщается, что может быть объяснено малой магнитудой землетрясения. Между тем, в истории известен случай, когда слабое землетрясение с такой же магнитудой 3.7 вызвало в 1992 г. заметное цунами с высотой 80 см на острове Хайнань в Тонкинском заливе [39]. Не исключено, что слабое землетрясение инициировало сход оползня, которое и послужило источником заметного цунами. Сейчас такие процессы активно изучаются [40]. Поскольку один из берегов Волги достаточно крутой, то схождение оползней с него является весьма вероятным, так что опасность цунами для водоемов в несейсмической зоне нельзя недооценивать.

Землетрясения такой же силы отмечаются и на Ладоге. Так, 30 ноября 1921 г. на восточном берегу Ладожского озера произошло землетрясение с магнитудой 4.2 (рис. 4). При этом не исключается возможность и более сильных землетрясений в прошлом [41]. На юге-востоке Ладожского озера сейсмическая активность проявляется в виде подземного (подводного) гула, иногда также сопровождающегося легкими колебаниями воды, фиксированными на островах Валаам и Высуанный [41]. После землетрясения 1921 г. глубина озера вблизи юго-западного берега острова Валаам, где имеется очень крутой подводный склон, увеличилась на 50 м, что, скорее всего, сопровождалось цунами. Наблюдения «легких колебаний воды» позволяют говорить о достоверном случае цунами на Ладоге.

Цунами оползневого происхождения. Многие цунами в озерах и реках вызваны как подводными, так и надводными оползнями. Такова, в частности, природа Нижегородского цунами, случившегося в 1597 г. на реке Волге; оно подробно описано и моделировано в работах [29, 42, 43]. Воспроизведем здесь описание исторического события из летописи [44]. *«В 1597 году, 18 июня, в день св.мученика Леонтия в третьем часу ночи разразился над Нижним Новгородом гнев Божий: оторвавшись от матерой земли оползла гора в Печерском монастыре и с растущим на ней лесом вдвинулась в Волгу сажень на 50, а местами и более, вследствие чего на реке поднялось страшное волнение: стоявшие на воде под монастырем суда выбросило на берег сажень в 20 от воды и более. Когда оползень оселся, в горе образовалось множество ключей. Оползнем разрушены были каменные монастырские церкви: Вознесения Господня, Покрова Богородицы, апостола и евангелиста Иоанна Богослова, Николая Чудотворца, святых Бориса и Глеба и Сергия Чудотворца; кроме того, разрушены были святые ворота, кельи, сушила, погребя и прочие монастырские службы. Церковь Покрова Богородицы вместе с трапезою расшатало, а под горою сдвинулись с места сажени на две церкви Николая Чудотворца и Евфимия Суздальского; колокольню же с колоколами совсем повалило. Чудотворный образ Богородицы и другие иконы, церковную утварь вынесли из церквей еще за неделю перед тем, когда появились первые признаки оползня у монастырского моста».* Этот монастырь изображен на картине, воспроизводимой на рис. 5. Из исторического описания можно сделать вывод, что источником оползня стало повышение уровня грунтовых вод, приведшее к разжижению грунта.

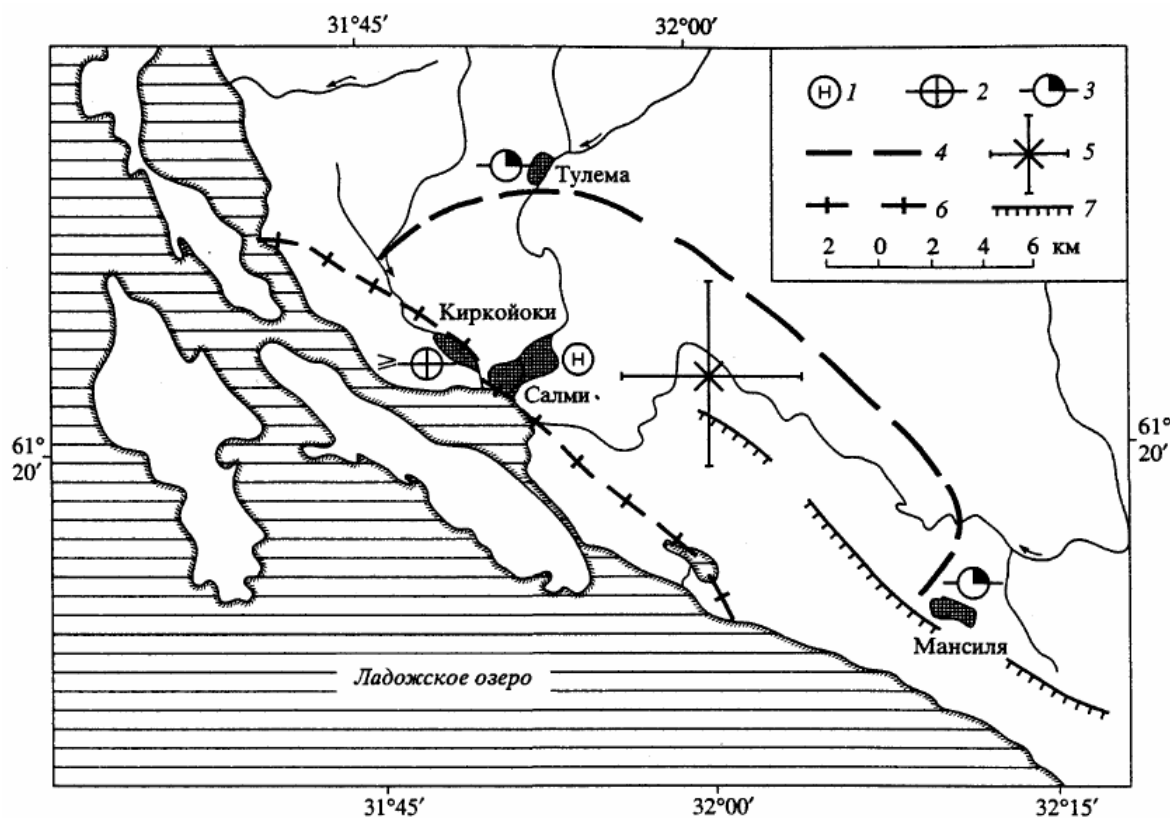


Рис. 4. Данные по землетрясению 30 ноября 1921 г. на восточном берегу Ладожского озера [41]: 1 – нет информации об интенсивности; 2 – интенсивность 4-5 баллов; 3 – интенсивность 5-6 баллов; 4 – изосейта 6 баллов; 5 – положение эпицентра; 6 – протяжение глубинного разлома; 7 – протяжение крутого, сложенного рыхлыми отложениями берегового обрыва



Рис. 5. Старый Печерский монастырь, засыпанный горой в XVI в.

Монастырь после оползня было решено отстроить заново в версте от разрушенного вверх по Волге, но и на новом месте история неоднократно фиксировала случаи оползней монастырских стен, хотя и не таких значительных, как в 1597 г. *«В 1829 году в половине мая при большом возвышении воды в реке Волге тогда бывшем, когда она начала сбывать, таковое же явление происходило близ нынешнего Печерского монастыря, не далее как на два аришина от башенки находящейся на северо-восточной стране. Вдруг позади домов подмонастырской слободы вдоль берега расстоянием сажень на двести начали показываться расщелины в садах, позади строений находящихся, которые все построены как и монастырь в полугоре. Сии расщелины даже приметны были и близ самой ограды монастырской на северо-восточной же стороне, но ограда осталась невредимою; а у обывателей на другой день земля начала и с садами мало-помалу отседать от домов и опускаться вниз. А так как ниже против сих домов по берегу еще находились дома, то у оных заднее строение, сараи, погреба начали опускаться в землю, а переднее – возвышаться; сады же, опустившись в некоторых местах до шести сажень отвесной высоты с заборами, с деревянными сторожками, без повреждения остановились»* [44]. В настоящее же время монастырь снова находится под угрозой разрушения, о чем свидетельствует трещина, проходящая через его стену со стороны реки Волги (рис. 6).

Следует отметить, что Волжский откос достаточно крутой, что способствует возникновению оползней. В той же летописи упоминается, что в 1867 г. был *«большой оползень над так называемыми соляными амбарами»*. Оползневая опасность высока и в настоящее время. Так, по данным Комитета охраны природы и управления природопользованием Нижегородской области только за 2000 г. в Нижнем Новгороде на участках оползневых склонов рек Оки и Волги образовались три новых оползня и активизировались 33 старых. Максимум оползневой активности был отмечен в апреле 2000 г. Наиболее крупным из вновь образовавшихся оползней был оползень в Почаинском овраге (в черте города): длина 45 м, ширина 30 м, глубина захвата пород смещением 5 м. При этом главными причинами возникновения оползней называются осадки, высокое стояние уровня грунтовых вод, эрозия берега. Последний значительный оползень произошел 9 ноября 2004 г. в Богородском районе Нижегородской области. С высокого берега реки Оки, с высоты примерно 50 м обрушился грунт (рис. 7) объемом около 10 тысяч кубометров [45]. Мы организовали обследование, чтобы проверить не возбудило ли обрушение цунами, однако выяснилось, что оползень остановился не доходя до воды. Тем не менее, это событие еще раз подчеркивает важность оценки цунами, возбуждаемых сходом оползней.



Рис. 6. Трещина у подножия Печерского монастыря, разломившая его стену



Рис. 7. Оползень, сошедший с высокого берега реки Оки в ноябре 2004 г.

Следует сказать, что оползневые явления характерны и для других районов Волги. Так, в статье [35] описывается оползень, случившийся в селе Федоровка, вблизи Сызрани (около 450 км от Нижнего Новгорода) в 1839 г.: «...вся движущаяся масса стала волноваться и в одних местах подымать, а в других ниспровергать строения; в короткое время, по всей этой осевшей площади, образовались значительные выпуклости и углубления, а обширные и правильные трещины представили ряды террас, как будто бы искусством созданных: там, где были болота и небольшие озера, выросли холмы; на местах же возвышенных оказались провалы, которые, как и многие трещины, наполнились водою. Самая же поверхность представила зыбкий плот. Заметное же волнение и движение земли продолжалось трое суток, потом постепенно стихло, и до 6 июля происходили осадки и разрушения только частные... Осадок долины простирается в длину 1.5 версты и в ширину до 250 сажень; на какое же пространство раздвинулась эта долина и выступила в Волгу, еще не исследовано. Судя же по обложению в значительном расстоянии от берега, на местах прежде глубоких, нарочитой величины холмов, состоящих из камней различного объема можно предположить, что уступ этот простирается на несколько десятков сажень... Из многих предположений касательно настоящего события, нельзя не обратить особого внимания на следующее: против того места, где образовался осадок, Волга особенно сжата берегами, и как кажется, не находя особого стока обильным водам своим, постепенно углубляет русло и подмывает правый берег, на котором расположено село Федоровка; а т.к. этот берег состоит из наносной земли и наплывов с гор, то естественно, что вода, просачиваясь между проницаемыми и непроницаемыми пластами, образовала пустоту, которая и засыпалась описанным осадком». Как видно из текста, этот оползень мог сопровождаться генерацией волн в реке, и мы включаем это событие в сводку, как возможное (вероятное) цунами. Отметим также оползневые явления на берегу реки Сура в селе Порецкое Симбирской губернии в 1865 г., и в Саратове в 1884 г. [35].

Не менее интересно описание цунами 1885 г. на реке Иртыш [38]. Образовавшаяся в результате схода оползня волна перевернула и отбросила к противоположному берегу судно, проходящее в километре от места обвала. *"...Песчаный правый берег Иртыша, подвергаясь подмыву, случается, обваливается, и эти обвалы или, как сибиряки говорят, "оползни", падая с грохотом и шумом с высоты в воду, бывают причиной аварий и несчастий. Такое несчастье именно случилось недели за три до нашего прохода. Верстах в двухстах от устья Иртыша мы видели шкуну, лежавшую беспомощно на боку в песках. Она проходила в версте от правого берега как раз в момент обвала. От падения такой массы земли с вековыми деревьями вода отпрянула от берега, образовав на реке волнение, и настолько сильное, что опрокинуло плоскодонную шкуну, бывшую, вероятно, без надлежащего балласта, отбросив ее к левому берегу. Баржа с грузом, которую вела на буксире шкуна, выдержала волну и осталась невредима. Из экипажа и пассажиров шкуны несколько человек погибли в реке, несколько были изувечены. День спустя после катастрофы на "Рейтерне", проходившем у этих мест, услышали с берега крики. Пароход остановился и забрал людей, требовавших помощи..."*

Из волн цунами в водохранилищах наиболее сильно впечатляет образование волн в 235 м в водохранилище Вайонт (Италия) 9 октября 1963 г., происшедшее в результате обрушения массива скальных пород объемом до 270 млн.м³ вблизи створа плотины [20]. Образовавшаяся гигантская волна устремилась в долину реки Пьяве, накрыв городок Лонжероне, в результате чего погибли все его жители. Необходимо подчеркнуть, что событие 1963 г. было уже вторым для водохранилища. При самом первом наполнении бассейна 4 ноября 1960 г. также случился оползень (объемом в 700 тыс.м³), вызвавший 10-метровую волну цунами на берегу. В другом итальянском водохранилище Понтезей образовавшаяся в результате оползня 20-метровая волна 22 марта 1959 г. убила ехавшего по дороге велосипедиста [20]. Для российских водохранилищ также имеется упоминание об образовании больших волн обвального происхождения (Красноярское водохранилище, 1970 г.) без конкретных данных [21], поэтому мы относим этот случай к возможным (вероятным) цунами.

Из этого перечисления ясно, что обвальные явления очень часто сопровождаются генерацией волн, и расчет волн цунами должен стать неотъемлемой частью оценки оползневых явлений в реках, озерах и водохранилищах.

Цунами вулканического происхождения. Одним из известных примеров цунами вулканического происхождения в нашей стране является извержение подводного вулкана в озере Карымское на Камчатке 2 января 1996 г., продолжавшееся 10-20 часов [46]. Озеро имеет относительно малые размеры: его диаметр 4 км и глубина 40-70 м. На рис. 8 представлены измеренные высоты наката волн цунами. Извержения носили взрывной характер и возникали примерно каждые 5 минут. Процесс извержения вулкана записывался на видео. Скорости извержения достигали 110 м/с, и очаг цунами представлял собой аксиально симметричное возвышение высотой 130 м, распространявшееся радиально со скоростями 20-40 м/с. На ближайшем берегу (примерно 1 км от кратера) волна цунами поднялась на 30 метров, приведя к эрозии берега (рис. 9).

Карымское цунами подтверждает основные свойства вулканических цунами: малый размер очага, очень большие высоты волн вблизи эпицентра и быстрое убывание высоты с расстоянием. Отметим, что знаменитое извержение вулкана Кракатау в Зондском проливе (Индонезия) в 1883 г. привело к накату волн на берег с максимальной высотой до 45 м, вызвав гибель 36 тыс. человек на берегах пролива. Волны цунами от этого извержения были зарегистрированы во многих странах; анализ мареограмм проведен в работе [47]. Карымское извержение является более слабым, чем извержение Кракатау, тем не менее, оно привело к очень большим высотам волн (30 м), так что долговременная опасность вулканических цунами на Камчатке и Курильских островах должна быть специально рассчитана.

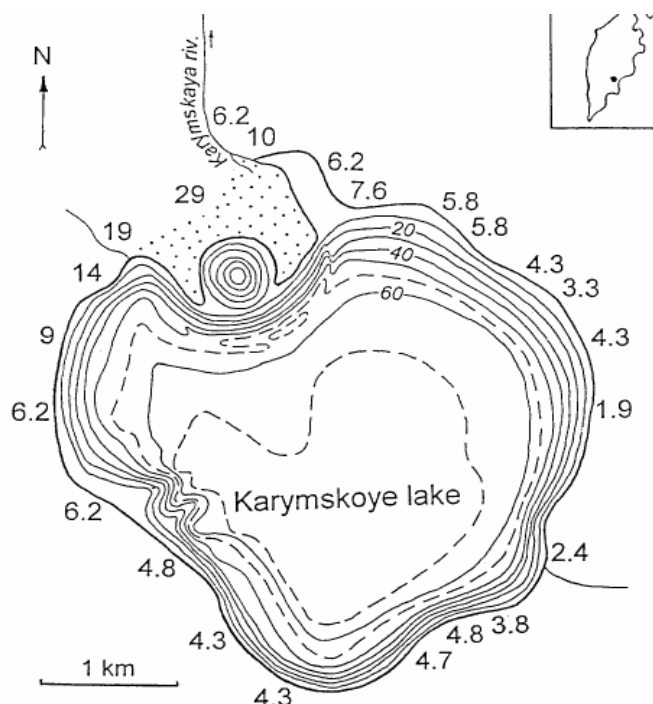


Рис. 8. Батиметрия Карымского озера с указанием измеренных высот волн цунами на берегу



Рис. 9. Карымское озеро на Камчатке. В центре виден кратер вулкана диаметром 600 м, справа на берегу – эрозийный участок высотой до 30 м, возникший после цунами 1996 г.

Обобщенные данные о цунами и цунамиподобных явлениях во внутренних водоемах России: реках, озерах и водохранилищах, где обычно опасностью цунами пренебрегают, приведены в таблице.

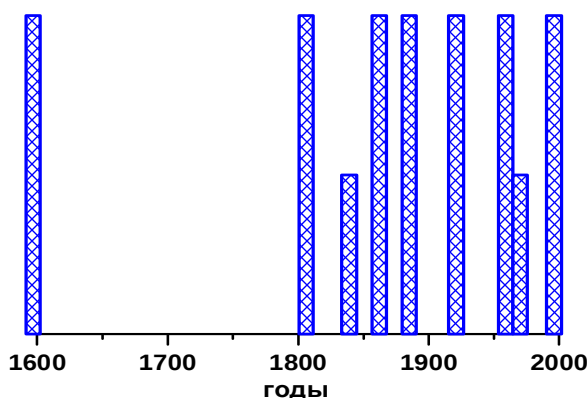
Всего выделено девять достоверных или почти достоверных событий за период 1597–2006 гг., их временное распределение показано на рис. 10 (два не вполне достоверных события отмечены меньшими размерами). Фактически за последние два столетия цунами во внутренних водоемах России возникали в среднем раз в 25 лет. Отметим, что цунами во внутренних водоемах возбуждаются теми же источниками, что в морях и океанах: землетрясениями, оползнями, вулканическими извержениями. Землетрясения и оползни ответственны за большую часть событий (по четыре) и одно возникло в результате извержения подводного вулкана (рис. 11). География цунамиподобных явлений представлена ранее на рис. 1. Четыре события случились в Европейской части Рос-

сии и пять – в Сибири и на Дальнем Востоке. Особый интерес вызывают цунами на Волге, в районе Нижнего Новгорода, вероятность возникновения которых отнюдь не ничтожна (три достоверных события на реке Волге). Все это указывает на необходимость оценки опасности цунами для этих регионов и информирования населения о возможных последствиях пребывания на берегах водоемов.

Таблица

Характеристики цунамиподобных явлений во внутренних водоемах России

	Год	Местоположение	Источник	Проявления	Надежность
1.	1597	Река Волга, Нижний Новгород	Оползень	Горизонтальный заплеск, 40 м	Достоверно
2.	1806	Река Волга, Козьмодемьянск	Землетрясение, $M = 3.7$	«Нарочитое колебание»	Достоверно
3.	1839	Река Волга, Сызрань	Оползень	Колебания воды	Вероятно
4.	1862	Озеро Байкал	Землетрясение, $M = 7.1$	Горизонтальный заплеск, 2 км	Достоверно
5.	1885	Река Иртыш	Оползень	Волна	Достоверно
6.	1921	Ладожское озеро	Землетрясение, $M = 4.2$	Легкие колебания	Достоверно
7.	1959	Озеро Байкал	Землетрясение, $M = 6.5$	Амплитуда, десяток см	Достоверно
8.	1970	Красноярское водохранилище	Оползень		Вероятно
9.	1996	Озеро Карымское, Камчатка	Извержение вулкана	Высота наката, 30 м	Достоверно

**Рис. 10.** Распределение цунами по годам**Рис. 11.** Распределение цунамиподобных явлений во внутренних водоемах России по механизмам генерации

И в заключение укажем, что, в принципе, мы должны включить в эту сводку два случая цунами астероидного происхождения: в Баренцевом море (140 млн. лет назад) и в районе города Калуга (350 млн. лет назад), но пока по установившейся традиции цунами астероидного происхождения обсуждаются отдельно.

Данное исследование поддержано грантами РФФИ (08-05-00069, 08-05-91850, 08-05-72011, 08-02-00039, 08-02-0631), европейским проектом “Extreme Seas”, ЕЕА грантом EMP41, сетью Мари Кюри SEAMOCs (MRTN-CT-2005-019374) и ProVention Consortium Grant № 3019. Авторы благодарят П.П.Шерстянкина и Т.Неаля за предоставленные ссылки о цунами в озере Байкал, Новой Зеландии и на Филиппинах.

Ключевые слова: цунами, реки, озера, водохранилища, внутренние водоемы, Россия.

Литература

1. Соловьев С.Л., Ферчев М.Д. Сводка данных о цунами в СССР. Бюллетень Совета по сейсмологии. 1961. № 9.
2. Соловьев С.Л. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР. 1737-1976 гг. Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С.61-136.
3. Щетников Н.А. Цунами на побережье Сахалина и Курильских островов по мареографным данным 1952-1968 гг. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990.
4. Заякин Ю.А. Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск - Камчатский: Комсат. 1996.
5. Го Ч.Н., Кайстренко В.М. и др. Количественная оценка цунамиопасности Тихоокеанского побережья СССР. Тихоокеанский ежегодник. Владивосток, 1988. С.9-17.
6. Иващенко А.И. и др. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. // Доклады РАН. 1996. Т. 348. № 4. С.532-538.
7. Yeh, H. et al. The 1994 Shikotan earthquake tsunamis // Pure and Applied Geophysics, 1995. V.144, P.855-874.
8. Доценко С.Ф. Цунами в Черном море // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. 1995. Т.30, С.483-489.
9. Никонов А.А. Повторяемость цунами на берегах Черного и Азовского морей // Изв. РАН, Физика Земли. 1997. №1, С.86-96.
10. Yalciner A. et al. Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data // J. Geophys. Research. 2004. V.109. No.C12. P.2003JC002113.
11. Зайцев А.И. Моделирование цунами в Черном море и катастрофического события 2004 года в Индийском океане. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ. мат. наук. Институт океанологии РАН. 2006.
12. Никонов А.А. Бывают ли цунами в Каспийском море? // Природа. 1996. № 1. С.72-73.
13. Пелиновский Е.Н. Предварительные оценки цунамиопасности Каспийского моря. Препринт. Н.Новгород: ИПФ РАН, 1999, № 480.
14. Доценко С.Ф. и др. Общая характеристика цунами в Каспийском море // Морской гидрофизический журнал. 2000. № 3. С.20-31.
15. Зайцев А.И. и др. Исторические цунами Каспийского моря и их моделирование // Известия АИН РФ Прикладная математика и механика. 2004. Т.9. С.121-134.
16. Morner N.A. Paleo-tsunamis in Sweden // Phys. Chem. Earth (B). 1999. V.24, P.443-448.
17. Shuvalov V. et al. Numerical simulations of the Mjølner marine impact crater // J. Geophys. Research. 2002. V.107. No.E7. P.2001JE001698.
18. Masaitis V.L. The middle Devonian Kaluga impact crater (Russia): new interpretation of marine setting // Deep-Sea Research II. 2002. V.49. P.1157-1169.
19. Kharif Ch., Pelinovsky E. Asteroid impact tsunamis // Comptes Rendus Physique. 2005. V.6. P.361-366.
20. Panizzo A. et al. Great landslide events in Italian artificial reservoirs // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. V. 5. P. 733-740.
21. Мамрадзе Г.П. и др. Прогнозирование волн в водохранилищах при сейсмических воздействиях. М.: Энергоатомиздат, 1991.
22. Schnellmann M. et al. Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits // Geology. 2002. V.30. P.1131-1134.
23. Amiran D.H.K. et al. Earthquakes in Israel and adjacent areas: macroseismic observations since 100 BC // Israel Exploration J. 1994. V.44. P.261-305.
24. Witkind J.I. The Hebgen Lake, Montana earthquake of August 17, 1959 // West Yellowstone-Earthquake Area. 1960. P.31-44.
25. Ichinose G.A. et al. The potential hazard from tsunami and seiche waves generated by large earthquakes within Lake Tahoe, California-Nevada // Geoph. Res. Lett. 2000. V.27. P.1203-1206.
26. De Lange W.P. et al. Tsunami generated by pyroclastic flows entering Lake Tarawera // EOS, Transactions, AGU, V.83. No.22. 2002. Western Pacific Meeting Supplement, OS51C-10: WP54.
27. De Lange W.P., Healy T.R. Tsunami hazards for the Auckland region and Hauraki Gulf, New Zealand // Natural Hazards. 2001. V.24. P.267-284.
28. Диденкулова И.И. Цунами в российских озерах и реках // Известия АИН РФ, Серия: Прикладная математика и механика. 2005. Т.14. С.82 – 90.
29. Диденкулова И. И. Моделирование наката длинных волн на плоский откос и анализ реальных событий. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ. мат. наук. Нижегородский государственный технический университет. 2006.

30. *Didenkulova I. et al.* Tsunamis in Russian lakes and rivers // *Geophysical Research Abstracts*, 2006. P.EGU06-A-00140.
31. *Мушкетов И.В., Орлов А.П.* Каталог землетрясений Российской империи. Санкт Петербург. 1893.
32. *Голенецкий С.И.* Землетрясения в Иркутске. Иркутск: Имя, 1997.
33. *Дашевский Ю.А., Мартынов А.А.* Обратные задачи электрических зондирований в сейсмоактивных районах. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2002.
34. *Никонов А.А.* Сейсмические мотивы в «Калевале» и реальные землетрясения в Карелии // *Природа*. 2004. № 8.
35. *Татевосян Р.Э., Мокрушина Н.Г.* Историческая сейсмичность Среднего Поволжья // *Изв. РАН Физика Земли*. 2003. Т.39, № 3, С.13-41.
36. *Диденкулова И.И. и др.* Цунами 1806 года в Козьмодемьянске на Волге // *Морские гидрофизические исследования*. 2007, № 1, С.73-76.
37. *Александров В.Е. и др.* О формировании диссипативных структур при моретрясениях // *Доклады АН СССР*. 1986. Т.289, № 5. С.1071-1074.
38. *Левин Б.В., Носов М.А.* Физика цунами. М.: Наука, 2005. 360 с.
39. *Lander J. et al.* Two decades of global tsunamis 1982-2002 // *Science of Tsunami Hazards*. 2003. V.21. No.1. P.3-88.
40. *Yalciner A.C. et al.* Submarine landslides and tsunamis // *NATO Science Series: IV. Earth and Environmental Sciences*; Kluwer, 2003. V. 21.
41. *Никонов А.А.* Восточно-ладожское землетрясение 30 ноября 1921 года // *Изв. РАН Физика Земли*. 2005. № 7. С.15-19.
42. *Диденкулова И.И. и др.* Нижегородское цунами 1597 года на реке Волга // *Известия АИН РФ, Серия: Прикладная математика и механика*. 2003. Т.4. С.170–180.
43. *Didenkulova I, Pelinovsky E.* The 1597 Tsunami in the River Volga // *Proc. Int. Workshop Local Tsunami Warning and Mitigation*. Moscow, 2002. P.17-22.
44. *Гациский А.* Нижегородский летописец. Нижний Новгород: Нижегородская ярмарка, 2001.
45. *Смирнова Ю.* Оползень «скосил» две дачи. Нижегородский Рабочий, 2004. № 212/15629.
46. *Belousov A. et al.* Tsunami generated by subaquatic volcanic explosions: unique data from 1996 eruption in Karymskoye Lake, Kamchatka, Russia // *Pure Appl. Geoph.* 2000. V.157. P.1135-1143.
47. *Pelinovsky E. et al.* Analysis of tide-gauge records of the 1883 Krakatau tsunami. Tsunamis: case studies and recent developments // *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Springer, 2005. V.23. P.57-77.

Статья поступила в редакцию 22.10.2008 г.