

Особенности использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности

© 2019 В.М. Кайстренко

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

E-mail: vict-k@mail.ru

Реферат. Статья посвящена развитию методов оценки повторяемости цунами с использованием данных о палеоцунами. Новым ключевым моментом является построение модели для количественного учета сохранности отложений палеоцунами. Для цельности изложения в статью включен краткий обзор результатов исследований изменчивости и сохранности отложений цунами. Модель протестирована на материалах о палеоцунами на побережье в районе Халактырки (поселка в составе г. Петропавловск-Камчатский), полученных ранее, для четырех временных интервалов, задаваемых четко прослеживаемыми в разрезах отложениями маркирующих пеплов извержений вулканов Ксудач в 1907 г., Авачинский в 1855 и в 1779 гг., Опала в 606 г. Приведены максимально правдоподобные оценки количества цунамигенных горизонтов для указанных временных интервалов. Проанализированы ограничения построенной модели, связанные с заложенными в нее условиями.

Ключевые слова: цунами, заплеск, палеоцунами, отложения цунами, повторяемость, цунамиопасность, вероятностная модель, статистика.

Для цитирования: Кайстренко В.М. Особенности использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности. *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 403–416.
<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416>

Peculiarity of using the paleotsunami data for the tsunami hazard estimation

Victor M. Kaistrenko

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

E-mail: vict-k@mail.ru

Abstract. The work is focused on the developing of the methods of the tsunami recurrence evaluation using paleotsunami data. The new key moment is the model for the quantitative evaluation of the preservation potential of the paleotsunami deposits. The short topical review on the preservation / changeability of the paleotsunami deposits is included. Paleotsunami data found earlier on the Khalaktyrka coast near Petropavlovsk-Kamchatskiy have been used for testing of the developed model. All the data have been divided and considered separately according to the time intervals between marker explosions of volcanoes Ksudach (1907), Avachinskiy (1855 and 1779) and Opala (606). The maximal confident estimates of the tsunami deposit numbers have been received as well as their probability of preservation. Some restrictions related to the model conditions have been analyzed.

Keywords: tsunami, run-up height, paleotsunami, tsunami deposits, recurrence, tsunami hazard, probabilistic model, statistics.

For citation: Kaistrenko V.M. Peculiarity of using the paleotsunami data for the tsunami hazard estimation. *Geosystems of Transition Zones*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 403–416. (In Russian)
<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416>

Геологические следы цунами на побережьях

Цунами – грозное природное явление, характерное для дальневосточного побережья России [Левин, Носов, 2005]. Редкость разрушительных цунами – благо для людей, проживающих на этих берегах, для ученых имеет и оборотную сторону – нехватку натурных данных о физике цунами, частоте и особенностях их проявлений на разных типах побережий. Недостаточность данных в каталогах исторических цунами, доступных в сети интернет [HTDB/WLD: Historical Tsunami Database...; NGDC: Tsunami Data...], не позволяет количественно оценить цунамиопасность для ряда побережий с приемлемой точностью. Требуемая для оценки повторяемости продолжительность времени регистрации сильных и катастрофических цунами, представляющих реальную опасность, – несколько столетий. К сожалению, такая длительность наблюдений, зафиксированная в исторических хрониках, имеется лишь для нескольких пунктов на тихоокеанском побережье Японии и Южной Америки.

Исследования, начатые независимо в разных странах, показали, что сильные цунами оставляют геологические следы на атакованных ими побережьях [Marinatos, 1939; Каплин, Ионин, 1961; Kastens, Cita, 1981; Moore and Moore, 1984, 1986; Bourgeois et al., 1988; Dawson et al., 1988; Бобыкина, 1990; Paskoff, 1991; Atwater, Moore, 1992].

Однако «прорыв» в этой области исследований произошел после пионерских работ К. Миноура [Minoura, Nakaya, 1991; Minoura, Nakata, 1994]. Было обнаружено, что сильное цунами 1983 г. в Японском море перенесло пляжный песок далеко вглубь берега, включая прибрежные озера. Исследование осадочных колоннок выявило, наряду с отложениями 1983 г., следы от прежних цунами, и, что важно – все эти песчаные прослои, как новые от цунами 1983 г., так и выделенные в осадочных колонках, оказались идентичными по составу и структуре, и, значит, это следы однотипных явлений.

Стало ясно, что все сильные цунами являются геологическим фактором в динамике прибрежной зоны. Цунами оставляют следы на побережьях в виде отложений (аккумуляция материала), но временами стирают такие следы вместе с частями берега (эрозия), сильно изменяя сам вид побережья. Так, одним из следствий Симуширского цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах явилась масштабная эрозия некоторых участков побережья о. Матуа [MacInnes et al., 2009a]. Перспектива получить необходимую информацию с помощью изучения следов доисторических событий заставила изучать палеоцунами, постепенно развивая технологию таких работ, которая включает методику поиска отложений, их идентификацию, временную привязку, а также методы их статистического анализа.

Следует отметить, что в значительной мере именно с исследованиями палеоцунами связана надежда получения количественных оценок повторяемости цунами, их опасности и риска с приемлемой точностью, что необходимо для планирования развития побережий и градостроительства в прибрежной зоне [Kaistrenko et al., 2003; Кайстренко и др., 2014; Свод правил... , 2017].

Постоянно расширяющийся фронт исследований следов палеоцунами в мире подчеркивает актуальность и перспективность таких исследований (рис. 1). К примеру, за 11 месяцев 2019 г. было опубликовано 169 работ по этой теме.

В России наиболее подробно исследованы палеоцунами на побережье Камчатки, Южных Курильских островов и Приморья,

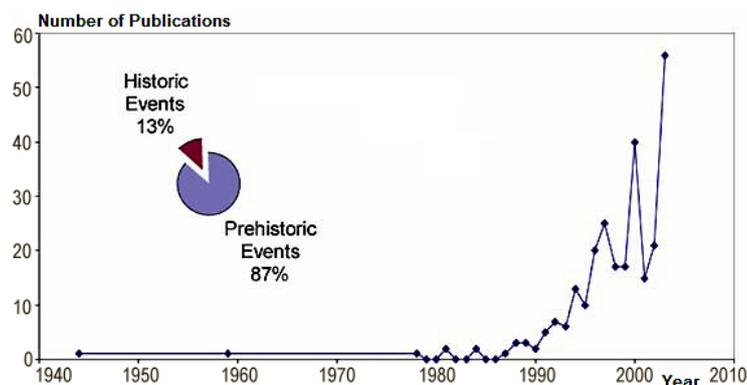


Рис. 1. Рост количества публикаций по теме отложений цунами до 2006 г. [Keating, 2006].

в меньшем масштабе – на Сахалине, Северных и центральных Курильских островах [Пинегина, Разжигаева, 2013; Bourgeois et al., 2006; Pinagina et al., 2003; Булгаков и др., 1995; Разжигаева и др., 2008, 2012; Ганзей и др., 2015].

Постоянно растущий объем данных о палеоцунами – очень перспективный материал и в то же время достаточно проблемный при непосредственном использовании для оценок цунамиопасности и риска, в частности из-за частичного «стирания» следов цунами.

Целью данной работы является разработка количественного метода получения оценок опасности, в первую очередь повторяемости цунами, с использованием данных о палеоцунами с учетом вероятности их сохранности.

Отложения современных цунами, их формирование и сохранность

При интерпретации данных по отложениям палеоцунами большое значение имеют результаты изучения особенностей осадконакопления, связанных с современными крупными цунами. Анализ отложений современных событий – Япономорских цунами 1983 и 1993 гг. на побережье Приморья, Шикотанского цунами 1994 г. (острова Шикотан, Юрий, Кунашир), Индонезийского 2004 г. (острова Симелу, Суматра), Симуширского 2006 г. (острова Симушир, Матуа, Расшуа, Рыпонкича) и Тохоку цунами 2011 г. (о. Шикотан) позволили выявить ряд закономерностей их формирования и сохранности, что необходимо для получения корректных оценок повторяемости цунами [Иванов, 1997; Разжигаева и др., 2007; MacInnes et al., 2009 a, b; Razjigaeva et al., 2014; Ганзей и др., 2015, 2017].

Даже на небольшой территории одно и то же цунами приводит к накоплению осадков разного состава. Зона осадконакопления, как правило, не достигает линии максимальной заплеска (рис. 2).

Рис. 2 показывает, что цунами откладывает наибольшее количество материала в «средней трети» зоны

затопления: вблизи берега материал слабо осаждается из высокоскоростного потока, а в зоне максимального заплеска материала в потоке уже почти не остается.

Отложения цунами на крутых склонах со временем обычно смываются атмосферными осадками, но в условиях прибрежных торфяников, где уклоны очень малы, отложенный цунами пляжный материал, в основном песок, с годами закрепляется растительным покровом и может затем сохраняться столетиями и тысячелетиями. Очевидно, до закрепления отложений цунами новым растительным покровом они подвержены существенному воздействию ветра и размыву атмосферными осадками и тальными водами. Кроме того, отложения цунами деформируются прорастающими снизу растениями и корнями нового растительного покрова, а также обитающими в этой среде насекомыми (биотурбация). Одна из актуальных задач при изучении отложений цунами – изучение изменчивости и сохранности (preservation potential) отложений цунами в масштабе геологического времени. И хотя эта проблема была обозначена довольно давно [Einsele et al., 1996; Иванов, 1997], она до сих пор остается актуальной.

При обследовании проявлений Япономорских цунами 1983, 1993 гг. на побережье Приморья в первые месяцы после событий анализ особенностей осадконакопления не проводился. Позже осадки этих цунами были найдены на побережье бухт, где величина заплеска волн, как правило, превышала 3 м. Выяснилось, что наилучшая сохранность осадков наблюдается в бухтах, приуроченных к низкопорядковым водотокам [Ганзей и др., 2017].



Рис. 2. Схематическое положение зон эрозии и аккумуляции материала в зоне воздействия прямого потока цунами по [Jaffe, Gelfenbaum, 2007].

Сохранность осадков Шикотанского цунами 1994 г. в нескольких бухтах тихоокеанского побережья о. Шикотан была обследована через год после события – большей частью они залегали песчаными пятнами или узкими полосами в небольших перегибах рельефа [Иванов, 1997]. Обследование, проведенное десятилетием позже [Разжигаева и др., 2007], показало, что осадки цунами 1994 г. сохранились в разрезах береговой зоны островов. Наиболее благоприятные условия для осаждения и захоронения осадков цунами создавались в локальных понижениях рельефа нижней части заболоченных долин за древними штормовыми валами на разном удалении от уреза моря (от 130 до 470 м).

Проявление катастрофического Тохоку цунами 2011 г. на побережье Южных Курильских островов, вследствие удаленности от очага, было умеренным. Тем не менее сравнительное исследование отложений этого цунами, проведенное в 2011 и 2012 гг., показало [Razjigaeva et al., 2013, 2014], что осадки цунами, отложенные поверх торфа, оставались влажными и активно зарастали травяным покровом. Перемещения осадков вследствие ветрового переноса обнаружено не было. Годовая изменчивость гранулометрического состава оказалась незначительной.

Интересные и значимые количественные результаты по теме сохранности отложений цунами изложены в работах [Szczucin'ski, 2012; Spiske et al., 2013], там же приведены ссылки на ряд других работ.

Исследования 5-летних изменений, произошедших в отложениях катастрофического цунами 2004 г. толщиной от нескольких миллиметров до более чем полуметра и документированных через 1, 2, 3 и 4 года вдоль 13 профилей на побережье Таиланда [Szczucin'ski, 2012], позволили сделать ряд важных заключений о динамике отложений цунами в условиях тропического климата с обильными сезонными ливнями.

Прежде всего, за время наблюдений существенно уменьшился пространственный размер зоны с распознаваемыми отложениями. На участках с толщиной отложений менее 1–2 см уже через год отложения не распознавались.

Среди ряда факторов, влияющих на сохранность/изменчивость отложений, важнейшим оказалась их исходная толщина. Тонкие слои песков и илов, отложенные цунами в местах с высотами волны менее 3 м (примерно 20 % мест), большей частью не сохранились, и вероятность сохранности прослоев толщиной менее 10 см оказалась достаточно мала. И наоборот, отложения толщиной более 10 см сохранились хорошо. В них даже сохранялась внутренняя структура, кроме самых верхних слоев, смытых, видимо, ливневыми потоками [Szczucin'ski, 2012].

В ряде профилей изначально типичный сдвиг гранулометрических распределений в сторону тонких фракций по мере удаления от берега сменился увеличением доли грубого материала с ростом расстояния от берега [Szczucin'ski, 2012].

Обследования илесто-песчано-обломочных отложений трех цунами на побережье Перу: Чимботе 1996 г., Каманья 2001 и Писко-Паракас 2007 г., проведенные в первый месяц после каждого события и повторенные в 2007 и 2008 гг., продемонстрировали заметную динамику отложений в сухом климате этого региона [Spiske et al., 2013]. Важнейшими факторами, определяющими изменчивость отложений цунами, оказались тип отложения, гранулометрический состав, биотурбация, ветер и антропогенное воздействие. В целом сохранность отложений из грубого материала оказалась заметно выше по сравнению с отложениями тонкого материала, которые из-за ветрового переноса начали эродировать сразу же после их образования. Однако в условиях сухого климата высохшие илестые прослойки твердели и сохранялись хорошо. Отмечено, что верхние слои отложений, подверженные поверхностным процессам, эродировали первыми [Spiske et al., 2013]. Финальный вывод, сделанный в цитируемой работе: материал, отложенный цунами в разрезах современных побережий, не является вполне представительным для непосредственной оценки уязвимости побережья к цунами и требует коррекции на изменчивость и сохранность. К похожему выводу пришли и авторы работы [Keating et al., 2011].

Схематическое объяснение причин изменений в отложениях цунами представлено на рис. 3.

Интересное наблюдение приведено в [Oliveira et al., 2008]: только в 25 % мест на атлантическом побережье, атакованных, согласно хроникам, катастрофическим Лиссабонским цунами в 1755 г., обнаружались отложения этого цунами. Это означает, что в остальных 75 % мест цунами либо не сформировало отложения, либо они не сохранились по причинам природного и антропогенного воздействия.

В условиях побережий Дальнего Востока России с умеренным климатом закрепление отложений цунами новым растительным покровом происходит медленнее, чем в зонах

с тропическим климатом, отложения также подвержены существенному воздействию ветра и размыву атмосферными осадками и талыми водами. Очевидно, что развитие методов и моделей, позволяющих количественно оценивать изменчивость/сохранность отложений цунами, актуально и в чисто научном и прикладном смысле для использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности.

Особенности статистического учета данных о палеоцунами на примере района Халактырка, Камчатка

В течение длительного времени основным видом натуральных материалов, с которыми работали специалисты по проблеме цунами, были данные о максимальных заплесках

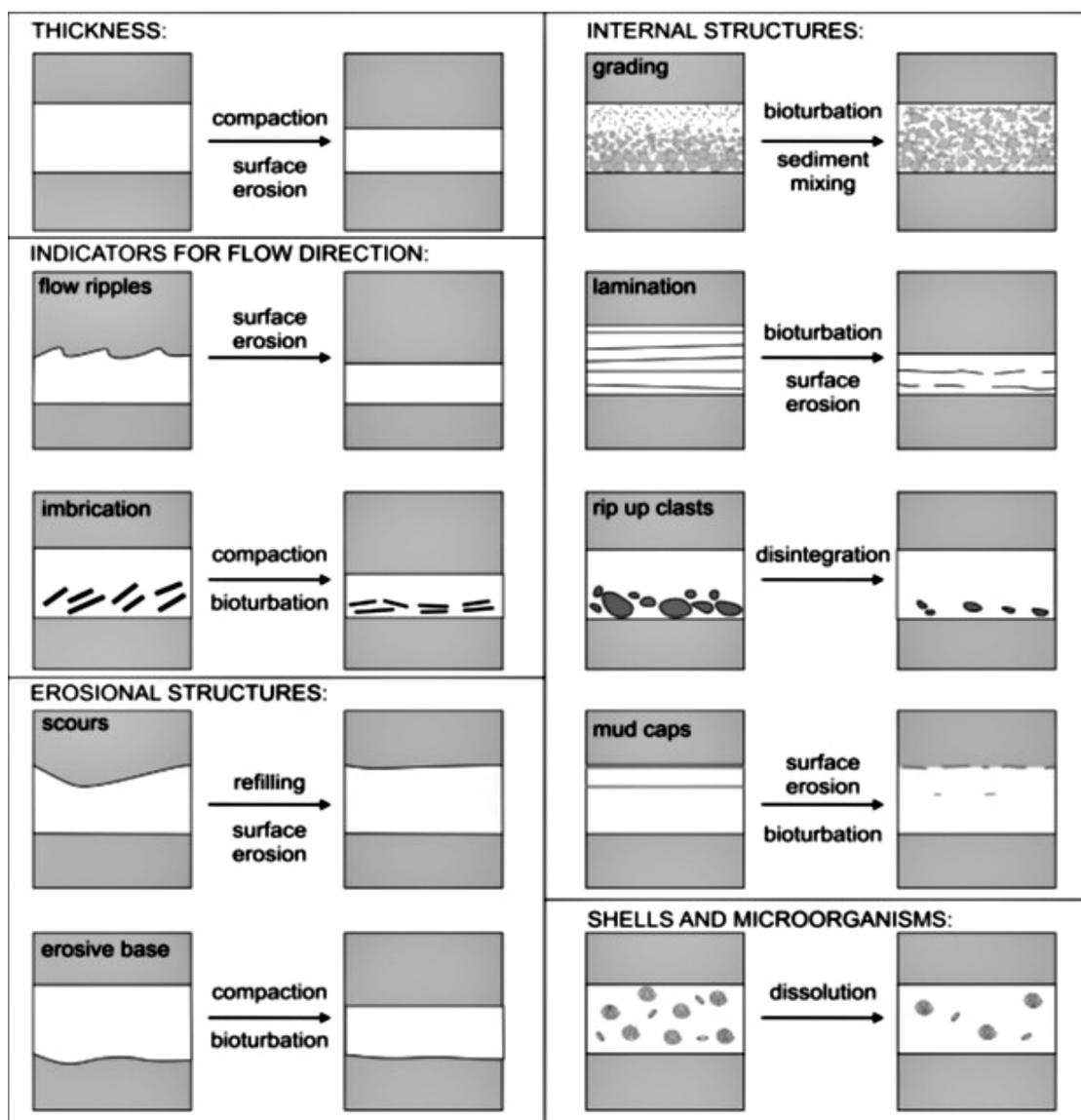


Рис. 3. Схематическое объяснение причин изменений в отложениях цунами [Spiske et al., 2013].

цунами, собранные в каталогах. Главная особенность такого материала – это данные о высотах, которые были *достигнуты* волнами цунами. Наличие же отложений палеоцунами, обнаруженных на некотором уровне над океаном, свидетельствует о том, что данный уровень цунами *превысило*. Каков же при этом был максимальный заплеск – неизвестно. Несомненно, что очень перспективные, хотя и достаточно проблемные, новые данные о палеоцунами и традиционные данные о заплесках цунами – это два разных типа данных, которые надо научиться использовать совместно.

Один из путей решения этой проблемы – разработка методик получения оценок заплесков на основе совокупности параметров отложений цунами. Три последних катастрофических цунами – Индонезийское 2004 г., Симуширское 2006 и Тохоку 2011 г. – предоставили полигоны для выявления закономерностей в динамике «свежих» отложений цунами, а также вызвали появление ряда работ, посвященных поиску зависимостей между характеристиками исходной волны цунами, такими как глубина и скорость потока, максимальная протяженность зоны затопления, величина вертикального заплеска, и параметрами отложений цунами, такими как протя-

женность песчаного покрова, появившегося в результате цунами, его гранулометрические, геохимические и диатомовые характеристики [Jaffe, Gelfenbaum, 2007; Abe et al., 2012; Cheng, Weiss, 2013; Chagué-Goff et al., 2015; Soulsby et al., 2007; Srisutam, Wagner, 2010; Witter et al., 2012]. Перенос закономерностей, найденных в этих работах для отложений современных цунами, на отложения палеоцунами с учетом изменчивости отложений до их фиксации, позволяет получать только достаточно грубые оценки вертикальных заплесков для палеоцунами.

На самом деле данные и о заплесках цунами, и о палеоцунами, собранные в каком-либо месте побережья, могут совместно и вполне корректно использоваться для построения функции повторяемости высот цунами для конкретного места. Суть такого прямого метода рассмотрена ниже на примере побережья в районе Халактырки, поселка в составе г. Петропавловск-Камчатский, открытого Тихому океану и, соответственно, подверженного воздействию цунами. Наличие свидетельств о проявлениях исторических цунами побудило провести поиск следов палеоцунами в этом районе (рис. 4 и 5) [Пинегина и др., 2002].

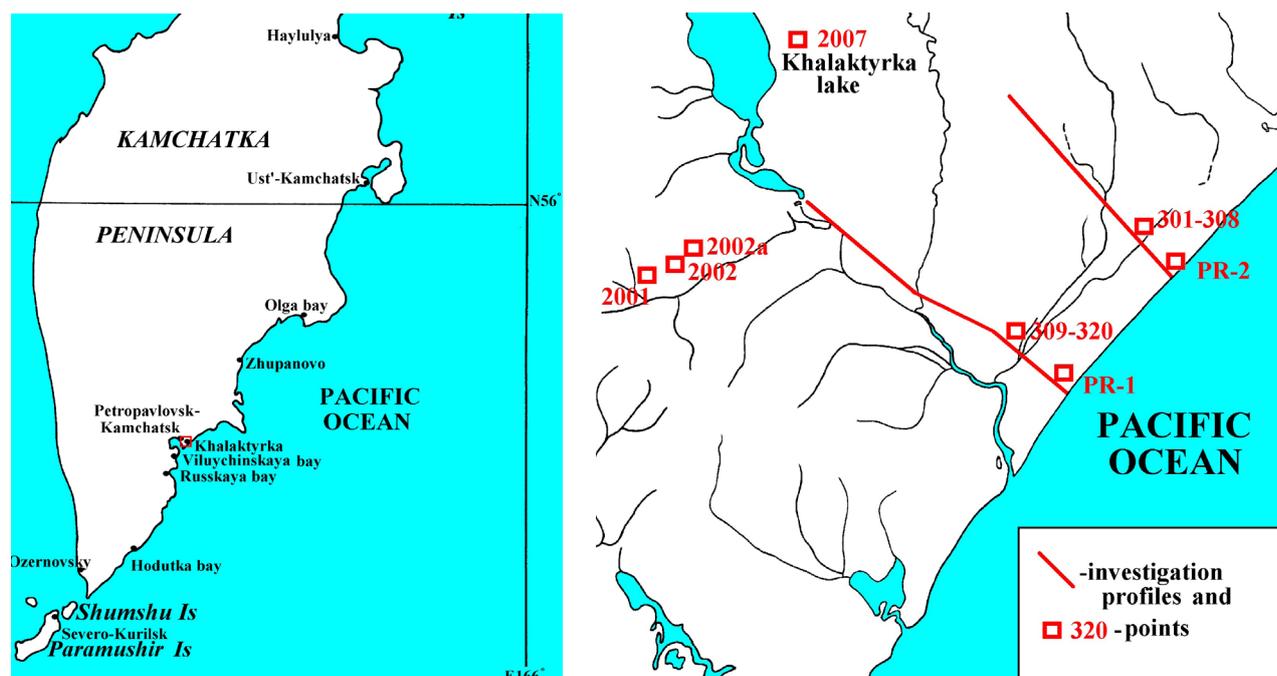


Рис. 4. Район исследований на тихоокеанском побережье Камчатки и местоположение профилей и разрезов [Пинегина и др., 2002].

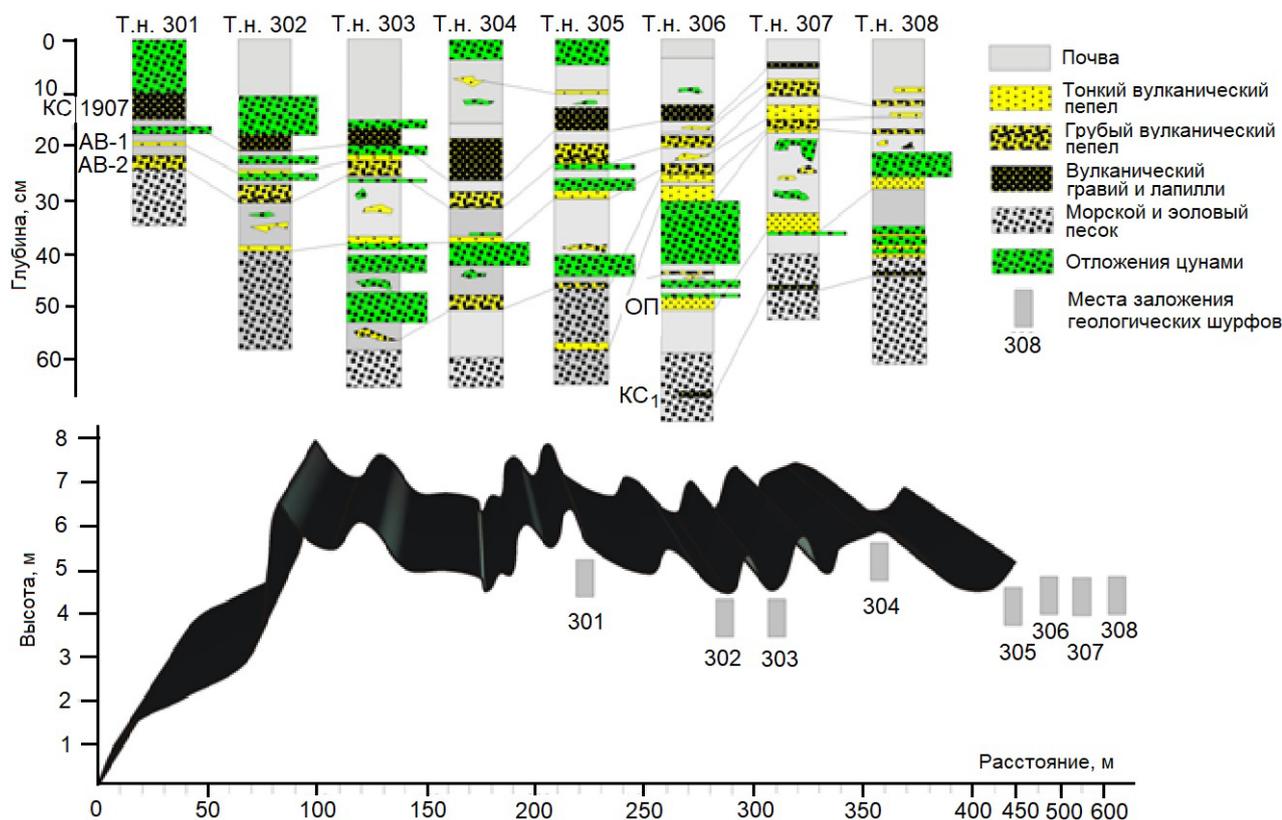


Рис. 5. Геоморфологический профиль 2 и схемы разрезов [Пинегина и др., 2002].

Рис. 5 демонстрирует типичные черты прослоев цунами. Как правило, отложения цунами образуют сплошные покровы лишь при высотах волны порядка 10 м и выше, чаще они располагаются пятнами. Воздействие поверхностных процессов снижает сохранность слоев и приводит к тому, что каждый разрез содержит свой набор отложений, с частичным перекрытием наборов из соседних разрезов. Отложения вулканических пеплов, как видно из рис. 5, прослеживаются вдоль профиля гораздо отчетливее и надежнее. И, соответственно, при корреляции и датировке отложений палеоцунами использовался метод тефростратиграфии и тефрохронологии, позволяющий определять стратиграфическое положение, относительный и абсолютный возраст цунамигенных горизонтов в геологических разрезах, опираясь на изученные ранее состав и возраст голоценовых маркирующих горизонтов вулканических пеплов для Камчатки [Braitseva et al., 1997].

В исследуемом районе на побережье Халактырского пляжа было выделено 13 цунамигенных горизонтов (Ц1–Ц13) [Пинегина и др., 2002]. Отложения цунами представле-

ны, как правило, тонкими (от 0.5 до 20 см) прослоями темно-серых, за счет примеси в них большого количества темноцветных минералов, морских песков, иногда с галькой (до нескольких сантиметров) и включениями древесины.

Понятно, что формирование следов различных цунами происходило в разных условиях. В то же время такую усредненную характеристику, как вероятность p сохранности отложений, следует использовать в условиях, близких к однородным. С этой целью можно разделить весь временной интервал, в котором выявлены цунамигенные горизонты, на ряд интервалов меньшей длительности, в пределах которых условия формирования отложений более однородны. Используем для этого четкие временные границы, задаваемые отложениями маркирующих пеплов извержений вулканов Ксудач в 1907 г. (КС1907), Авачинский в 1855 (АВ-1) и в 1779 гг. (АВ-2), Опала в 606 г. (ОП), Ксудач в 236 г. (КС₁) (рис. 5) и Авачинский около 1500 лет до н.э. (АВ-12). С этой же целью для исследования выбраны компактные группы разрезов в «средней» части профилей 1 и 2:

302–306 (на расстоянии 270–500 м от уреза, рис. 5) и 309–313 (на расстоянии 250–440 м от уреза) [Пинегина и др., 2002].

Данные о количестве цунамигенных прослоев в каждом из исследуемых разрезов, попадающих во временной интервал между горизонтами маркирующих вулканических пеплов, сведены в таблицу.

Позиции разрезов 302–306 и 309–313 разновысотные, однако с отложениями цунами в этих разрезах ассоциируется высота берегового вала h , поскольку цунами достигло их, преодолев береговой вал высотой $h = 8$ м (рис. 5).

Пусть в некотором пункте (территории) у побережья имели место N палеоцунами, с отложениями которых ассоциирована высота h над уровнем океана. Известно, что последовательность сильных цунами близка к пуассоновской [Geist, Parsons, 2008]. Этой ситуации отвечает вероятность превышения уровня h при N цунами за период времени T :

$$P_N = e^{-\varphi(h)} \frac{[\varphi(h) \cdot T]^N}{N!}, \quad (1)$$

где $\varphi(h)$ – функция повторяемости высот цунами (ФПЦ), важнейшая характери-

ка цунамиактивности; знание этой функции позволяет количественно оценивать цунами-опасность. В соответствии с определением, ФПЦ – это средняя частота событий в заданном месте с высотой равной или превышающей пороговое значение h :

$$\varphi(h) = \stackrel{\text{def}}{=} \left\langle \frac{N(\text{заплеск} \geq h)}{T} \right\rangle, \quad (2)$$

где N есть число таких событий, произошедших за период времени T . Показано [Kaistrenko, 2011, 2014], что функция повторяемости высот цунами зависит от двух параметров, характеризующих цунамиактивность заданного места с координатами x : регионального параметра – асимптотической частоты сильных цунами f , и локального параметра – характеристической высоты цунами H^* :

$$\varphi(x; h) = f \cdot \Phi \left(\frac{h}{H^*(x)} \right), \quad (3)$$

где функцию Φ комбинированного аргумента $h / H^*(x)$ требуется определить на основе натуральных данных. Показано, что для больших высот исторических цунами и палеоцунами (цунами с малыми высотами не опасны и не оставляют следов) функцию Φ в (3)

Количество цунамигенных прослоев в разрезах, относящихся к заданному временному интервалу, и оценка вероятности их сохранности

Разрез	Временной интервал, годы			
	Наст. время – 1907	1907–1855	1855–1779	1779–606
302	1	1	1	0
303	1	1	0	0
304	2	0	0	0
305	2	0	0	0
306	1	0	0	0
309	2	0	1	3
310	0	0	0	0
311	1	0	0	3
312	1	0	0	2
313	1	0	2	2
Цунамигенные прослой	Ц1–Ц2	Ц3	Ц4–Ц5	Ц6–Ц8
Наиболее вероятное количество N прослоев палеоцунами	2	1	Неопределенное	Неопределенное
p	0.6	0.2	≥ 2 ≤ 0.2	≥ 3 ≤ 0.33

Примечание. Выделены наиболее правдоподобные оценки вероятности сохранности отложений.

можно аппроксимировать экспонентой [Kaistrenko, 2014]:

$$\varphi(x; h) = f \cdot e^{-\frac{h}{H^*(x)}}. \quad (4)$$

Формулу (1) невозможно использовать непосредственно, поскольку она содержит неизвестное значение $\varphi(h)$ функции повторяемости высот цунами, отвечающее пороговой высоте h над уровнем океана. Однако известно, что вероятность P_N принимает наибольшее значение при $\varphi(h) = N / T$. Это максимально правдоподобное [Крамер, 1975] значение ФПЦ, соответствующее отложениям N палеоцунами, с которыми ассоциирована высота h над уровнем океана. Таким образом, на основе надежных оценок количества отложений N палеоцунами и временного периода T их образования можно получить максимально правдоподобные оценки значения функции повторяемости высот цунами $\varphi(h)$ для ассоциированной с этими отложениями высоты h над уровнем океана. Следует отметить, что максимальное значение вероятности P_N при этом достаточно мало и зависит только от реального числа отложений цунами N . Подставляя максимально правдоподобное значение ФПЦ в формулу (1), получим

$$\max P_N = e^{-N} \frac{N^N}{N!}, \quad (5)$$

что дает $\max P_1 = e^{-1}$ при $N = 1$. Используя формулу Стирлинга для факториала [Лаврентьев, Шабат, 1987], можно получить более удобную асимптотику для оценок искомого значения $\max P_N$ при больших значениях N :

$$\max P_N \sim \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \left(1 - \frac{1}{12N} + O\left(\frac{1}{N^2}\right)\right). \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что ситуации с находками большого количества отложений цунами, относящихся к любому уровню h , весьма редки априори.

На самом деле мы не можем быть уверены, что выявленные n отложений палеоцунами – это и есть все палеоцунами N в некотором пункте (территории) у побережья, относящиеся к периоду времени T и ассоциированные с высотой h над уровнем океана, поскольку не все следы палеоцунами сохра-

няются. Вероятность p_n обнаружить в разрезе n прослоев палеоцунами, ассоциированных с некоторым уровнем h , с учетом вероятности p их сохранности можно посчитать: эта вероятность складывается из вероятности сохранения n палеоцунами из n , реально имевших место, плюс вероятности имевших место $(n + 1)$ палеоцунами, от которых в разрезе сохранились только n прослоев, и т.д.:

$$\begin{aligned} p_n &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)} \left[\frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^n}{n!} C_n^n p^n + \right. \\ &+ \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^{n+1}}{(n+1)!} C_{n+1}^n p^n q + \\ &+ \left. \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^{n+2}}{(n+2)!} C_{n+2}^n p^n q^2 + \dots \right] = \\ &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)} \left[\frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^n}{n!} \frac{n!}{n! 1!} p^n + \right. \\ &+ \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^{n+1}}{(n+1)!} \frac{(n+1)!}{n! 1!} p^n q + \\ &+ \left. \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^{n+2}}{(n+2)!} \frac{(n+2)!}{n! 2!} C_{n+2}^n p^n q^2 + \dots \right] = \\ &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)} \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^n}{n!} p^n \left[1 + \right. \\ &+ \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^1}{1!} q + \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^2}{2!} q^2 + \dots \left. \right] = \\ &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)(1-q)} \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)p\right)^n}{n!} = \\ &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)p} \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)p\right)^n}{n!}, \quad (7) \end{aligned}$$

где $q = 1 - p$ – вероятность «стирания» следов палеоцунами.

Сравнение формул (1) и (7) показывает, что частичная сохранность следов палеоцунами приводит к появлению занижающего коэффициента $p < 1$ при $\varphi(h)$, что, соответственно, пропорционально уменьшает оценку величины повторяемости цунами, получаемой непосредственным подсчетом количества прослоев палеоцунами.

Покажем, что при работе с несколькими разрезами, ассоциированными с одинаковой для них высотой h над уровнем океана, можно получить оценки вероятности p сохранности

следов палеоцунами и оценку их реального количества N , которое характеризует повторяемость палеоцунами (см. формулу (3)) и может не совпадать с количеством n обнаруженных следов ($n \leq N$). Пусть в m таких разрезах обнаружили n_1, n_2, \dots, n_m отложений цунами, относящихся к одному и тому же периоду времени T . Как получить реалистичную оценку количества N палеоцунами?

Прежде всего вероятность обнаружить в k -м разрезе n_k отложений из N реально имевших место палеоцунами можно оценить биномиальным распределением [Крамер, 1975]:

$$P_{(k)} = C_N^{n_k} p^{n_k} q^{N-n_k} \quad (8)$$

и построить функцию правдоподобия, равную произведению вероятностей, относящихся к каждому разрезу:

$$\begin{aligned} L &= \prod_{k=1}^m P_{(k)} = \prod_{k=1}^m \frac{N!}{n_k! \cdot (N-n_k)!} p^{n_k} q^{N-n_k} = \\ &= \prod_{k=1}^m \frac{N! \cdot q^N}{n_k! \cdot (N-n_k)!} \left(\frac{p}{q}\right)^{n_k}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для упрощения анализа обычно используется логарифмическая функция правдоподобия:

$$\begin{aligned} \ln L &= \ln \prod_{k=1}^m P_{(k)} = \\ &= \ln \prod_{k=1}^m \frac{N! \cdot q^N}{n_k! \cdot (N-n_k)!} \left(\frac{p}{q}\right)^{n_k} = m \cdot \ln N! + \\ &+ mN \cdot \ln q + \sum_{k=1}^m [n_k \cdot \ln \frac{p}{q} - \ln(n_k!) - \\ &- \ln(N-n_k)!]. \end{aligned} \quad (10)$$

Значения количества палеоцунами N и вероятности p , максимизирующие величину функции правдоподобия, следует использовать как наиболее вероятные (максимально правдоподобные). Максимизировать величину функции правдоподобия можно либо по одной из переменных (только по N или по p , если значение другой переменной не вызывает сомнения), либо совместно по N и p .

Задачу поиска максимума функции правдоподобия $\ln L$ по двум переменным N и p можно упростить сведением к задаче поиска максимума по одной переменной, поскольку значения параметров N и p , соответствующих максимальной вероятности $\ln L$ при фиксиро-

ванном значении N , связаны аналитической зависимостью, получаемой из условия максимума $\ln L$ только по параметру p :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln L}{\partial p} &= -\frac{mN}{q} + \sum_{k=1}^m [n_k \cdot \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q}\right)] = \\ &= -\frac{mN}{q} + \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{pq} = -\frac{mN}{q} + \\ &+ \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{pq} = \frac{1}{q} [-mN + \frac{1}{p} \sum_{k=1}^m n_k] = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

откуда получаем

$$p = \frac{\sum_{k=1}^m n_k}{mN}. \quad (12)$$

Значение для p , задаваемое формулой (12), является максимально правдоподобным при известном значении количества палеоцунами N . Если величину N требуется оценить совместно с p , нужно подставить полученное значение p в формулу (10). В результате получим зависимость $\ln L$ только от N :

$$\begin{aligned} \ln L &= m \cdot \ln N! + mN \cdot \ln q + \ln \frac{p^{\sum_{k=1}^m n_k}}{q^{\sum_{k=1}^m n_k}} - \\ &- \sum_{k=1}^m \ln(n_k!) - \sum_{k=1}^m \ln(N-n_k)! = \\ &= mN \cdot \ln q + \ln \frac{p^{\sum_{k=1}^m n_k}}{q^{\sum_{k=1}^m n_k}} - \sum_{k=1}^m \ln(n_k!) + \\ &+ \sum_{k=1}^m (\ln N! - \ln(N-n_k)!), \end{aligned} \quad (13)$$

которая анализируется численно перебором (разумных) значений N , начиная с максимального количества прослоев цунами $\max n_k$ в ряду величин n_1, n_2, \dots, n_m .

Значения оценок количества отложений цунами N и вероятности p их сохранности в заданных временных интервалах, полученные максимизацией функции правдоподобия, внесены в вышеприведенную таблицу.

Анализ функции правдоподобия (12) показал, что оценки количества цунамигенных горизонтов для временных интервалов настоящее время – 1907 г. и 1907–1855 гг. действительно являются максимально правдоподобными: наиболее вероятное количество палеоцунами, реально имевших место, согласующееся с их распределением в 10 разрезах, совпадает с количеством выделенных прослоев Ц1–Ц2 и Ц3 соответственно (см. таблицу).

Интересно, что оценки вероятности сохранности цунамигенных прослоев для этих

временных интервалов, $p = 0.6$ и $p = 0.2$, характеризующие условия их формирования, существенно различаются.

Для двух других временных интервалов: 1855–1779 и 1779–606 гг. – количество выделенных прослоев Ц4–Ц5 и Ц6–Ц8 не согласуется с их распределением в 10 разрезах, и этим количествам не отвечает максимум функции правдоподобия. Причин, объясняющих такое расхождение, может быть несколько. Возможно, что для статистической компенсации низкой вероятности сохранения следов некоторых цунами недостаточно 10 исследуемых разрезов. Возможно также, что условия формирования цунамигенных отложений в течение этих более длительных периодов времени могли существенно изменяться, что нарушает требование однородности условий, заложенных в модель.

Несмотря на ряд естественных ограничений, развиваемый количественный подход к оценкам параметров формирования цунамигенных отложений может с успехом применяться как стартовый для получения адекватных количественных оценок цунамиопасности и риска.

В качестве примера на рис. 6 приведена совместная функция повторяемости высот цунами для Халактырки, построенная ранее [Kaistrenko et al., 2003] методом наименьших квадратов по данным об исторических цунами 1841, 1952 и 1960 гг. и 11 палеоцунами за период начиная с 236 г., без учета вероятности сохранности цунамигенных отложений.

Рис. 6 демонстрирует значимость данных палеоцунами – именно 11 палеоцунами соот-

ветствует одно значение функции повторяемости с малым значением стандартного отклонения (априорной погрешности), по сравнению с большими стандартными отклонениями для (всего) 3 сильных исторических цунами.

Заключение

Данные о палеоцунами очень важны для получения оценок цунамиопасности (повторяемости и характерных высот) и риска с приемлемой точностью, что необходимо как для решения чисто научных задач, так и для планирования развития побережий и градостроительства в прибрежной зоне. Однако использование данных о палеоцунами непосредственно может привести к занижению оценок повторяемости, и поэтому необходимо учитывать особенности их формирования и изменений, происходящих в отложениях цунами до их фиксации.

С использованием метода максимального правдоподобия построена модель для оценок реального количества N палеоцунами (которое характеризует повторяемость цунами) и вероятности p сохранности их следов, на основе данных о количестве отложений палеоцунами в нескольких разрезах, ассоциированных с одинаковой для них высотой h над уровнем океана и временным периодом T их образования.

Модель протестирована на материалах о палеоцунами на побережье в районе Халактырки, поселка в составе г. Петропавловск-Камчатский, для четырех временных интервалов T , задаваемых четкими отложениями маркирующих пеплов извержений вулканов Ксудач в 1907 г., Авачинский в 1855 и в 1779 гг., Опала в 606 г. Оценки количества цунамигенных горизонтов для временных интервалов настоящее время – 1907 г. (Ц1 и Ц2) и 1907–1855 гг. (Ц3) являются максимально правдоподобными. Для двух других временных интервалов: 1855–1779 и 1779–606 гг. – количество выделенных прослоев Ц4–Ц5 и Ц6–Ц8 не согласуется с их распределением в 10 разрезах и этим количествам не отвечает максимум функции правдоподобия. Это объясняется как ограничениями построенной модели, связанны-

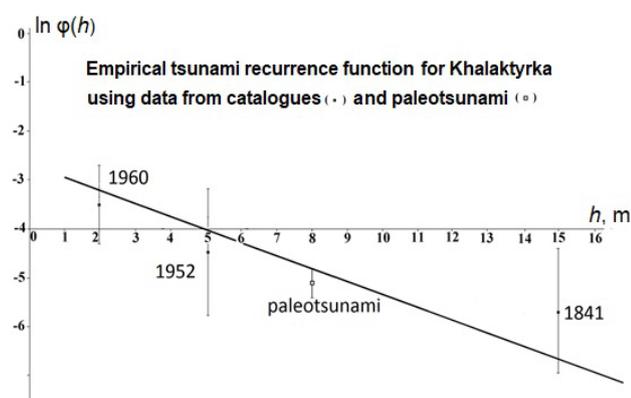


Рис. 6. Эмпирическая функция повторяемости высот цунами для Халактырки [Kaistrenko et al., 2003].

ми с заложенными в модель условиями, так и низкой вероятностью сохранения следов некоторых цунами.

Несмотря на ряд естественных ограничений, развиваемый количественный подход к оценкам параметров формирования цунамигенных отложений может с успехом применяться как стартовый для получения адекватных количественных оценок цунами-опасности и риска.

Благодарности

Автор благодарит анонимных рецензентов, замечания которых позволили устранить ряд недостатков.

Работа поддержана Дальневосточным отделением РАН (проект № 18-5-003. «Катастрофические цунами в Дальневосточном регионе России»).

Список литературы

1. Бобыкина В.П. Цунами как экзогенный берегоформирующий фактор // *Новые данные по геоморфологии и геологии западной части Тихого океана*. Владивосток: ТОИ ДВО АН СССР, 1990. С. 51–57.
2. Булгаков Р.Ф., Иванов В.В., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д., Храмушин В.Н. Исследование следов палеоцунами для цунамирайонирования // *Физика Земли*. 1995. № 2. С. 18–27.
3. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Нишимура Ю., Гребенникова Т.А., Кайстренко В.М., Горбунов А.О., Арсланов Х.А., Чернов С.Б., Наумов Ю.А. Осадки исторических и палеоцунами на побережье Восточного Приморья // *Тихоокеанская геология*. 2015. № 1. С. 79–95. [Ganzei L.A., Razjigaeva N.G., Nishimura Yu., Grebennikova T.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Arslanov Kh.A., Chernov S.B., Naumov Yu.A. Deposits of historical and paleotsunamis on the coast of Eastern Primorye // *Russian J. of Pacific Geology*. 2015, 9(1): 64–79. doi.org/10.1134/S1819714015010029]
4. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Нишимура Ю., Гребенникова Т.А., Горбунов А.О., Кайстренко В.М., Наумов Ю.А., Лебедев И.И. Осадки цунами 1983 и 1993 годов на побережье Приморья // *Океанология*. 2017. Т. 57(4). С. 628–640 [Ganzei L.A., Razjigaeva N.G., Nishimura Yu., Grebennikova T.A., Gorbunov A.O., Kaistrenko V.M., Naumov Yu.A., Lebedev I.I. Deposits of the 1983 and 1993 tsunamis on the coast of Primorye // *Oceanology*. 2017, 57(4): 568–579. https://doi.org/10.1134/S0001437017040075]
5. Иванов В.В. Исследование влияния цунами на осадконакопление по следам цунами 4 октября 1994 года // *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 119–128. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 8).
6. Кайстренко В.М., Клячко М.А., Храмушин В.Н., Золотухин Д.Е. Оценка цунамиопасности и построение карт цунамирайонирования для побережья Сахалинской области. Проблема нормативов // *Строительная индустрия Сахалина*. 2014. № 19. С. 38–43.
7. Каплин П.А., Ионин А.С. Некоторые особенности рельефа побережья Курило-Камчатской зоны в связи с проблемой цунами // *Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР*. 1961. № 9. С. 74–88.
8. Крамер Г. *Математические методы статистики*. М.: Мир, 1975. 648 с. [Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics*. Bombay; New-York: Asia Publ. House, 1946. 575 p.]
9. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. *Методы теории функций комплексного переменного*. М.: Наука, 1987. 688 с.
10. Левин Б.В., Носов М.А. *Физика цунами и родственных явлений в океане*. М.: Янус-К, 2005. 360 с. [Levin B.W., Nosov M.A. *Physics of Tsunamis*. 2nd ed. Springer Intern. Publ. Switzerland, 2016. 388 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24037-4]
11. Пинегина Т.К., Буржуа Д., Базанова Л.И., Брайцева О.А., Егоров Ю.О. Отложения цунами и анализ цунамиопасности на Халактырском пляже в районе Петропавловска-Камчатского, Тихоокеанское побережье Камчатки, Россия // *Сб. статей по результатам междунар. конф. «Локальные цунами: предупреждение и уменьшение риска», Петропавловск-Камчатский, 10–15 сентября 2002 г.* М.: Янус-К, 2002. С. 142–151. [Pinegina T.K., Bourgeois J., Bazanova L.I., Braitseva O.A., Egorov Yu.O. Tsunami and analysis of tsunami risk at Khalaktyrka beach region of Petropavlovsk-Kamchatsky, Pacific coast of Kamchatka. In: *Proceedings of the International workshop “Local tsunami warning and mitigation”, Petropavlovsk-Kamchatsky, September 10–15, 2002*. English book. Moscow: Ianus-K, 2002. P. 122–131.]
12. Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г. Исследования палеоцунами на дальневосточном побережье России // *Мировой океан. Т. I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане*. М.: Научный мир, 2013. С. 488–498.
13. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Ильев А.Я., Кайстренко В.М. Осадки цунами Шикотанского землетрясения 1994 г. // *Океанология*. 2007. Т. 47(4). С. 622–630. [Razjigaeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., P'ev A.Ya., Kaistrenko V.M. Tsunami Deposits of the Shikotan Earthquake of 1994 // *Oceanology*. 2007, 47(4): 579–587. https://doi.org/10.1134/S0001437007040157]
14. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Ильев А.Я., Кайстренко В.М. Геологическая летопись палеоцунами на о. Шикотан (Малая Курильская гряда) в голоцене // *Вулканология и сейсмология*. 2008. № 4. С. 50–66. [Razjigaeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., P'ev A.Ya., Kaistrenko V.M. The geological record of paleotsunamis striking Shikotan Island, in the Lesser

- Kurils, during Holocene time // *J. of Volcanology and Seismology*. 2008, 2(4): 262-277. <https://doi.org/10.1134/S0742046308040040>
15. Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Кайстренко В.М., Арсланов Х.А., Горбунов А.О. Проявление палеоцунами на Малой Курильской гряде в голоцене // *Тихоокеанская геология*. 2012. Т. 31, № 6. С. 48–56 [Razzhigayeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Gorbunov A.O. Manifestation of Holocene Tsunamis on the Lesser Kuril Ridge // *Russian J. of Pacific Geology*. 2012, 6(6): 448-456. <https://doi.org/10.1134/S1819714012060061>]
 16. Свод правил «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» (СП 292.1325800.2017) / Клячко М.А., Зайцев А.И., Заритовский Н.Г., Кайстренко В.М., Максимов В.В., Нуднер И.С., Пелиновский Е.Н., Рутман Ю.Л., Фильков В.Ю., Штанько Л.Ф. М.: Минстрой России, 2017. 138 с.
 17. Abe T., Goto K., Sugawara D. Relationship between the maximum extent of tsunami sand and the inundation limit of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Sendai Plain, Japan // *Sedimentary Geology*. 2012. Vol. 282. P. 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.05.004>
 18. Atwater B.F., Moore A.L. A tsunami about 1000 years ago in Puget Sound, Washington // *Science*. 1992. Vol. 258(5088). P. 1614–1617. doi:10.1126/science.258.5088.1614
 19. Bourgeois J., Hansen T.A., Wiberg P.L., Kauffman E.J. A tsunami deposit at the Cretaceous–Tertiary boundary in Texas // *Science*. 1988. Vol. 241(4865). P. 567–570. doi:10.1126/science.241.4865.567
 20. Bourgeois J., Pinegina T.K., Ponomareva V., Zaretskaia N. Holocene tsunamis in the southwestern Bering Sea, Russian Far East, and their tectonic implications // *GSA Bulletin*. 2006. Vol. 118(3/4). P. 449–463. <https://doi.org/10.1130/B25726.1>
 21. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzitsky L.D., Melekestsev I.V., Bailey J. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // *Quaternary Research*. 1997. Vol. 47. P. 125–139. <https://doi.org/10.1006/qres.1996.1876>
 22. Chagué-Goff C., Goff J., Wong H.K.Y., Cisternas M. Insights from geochemistry and diatoms to characterise a tsunami's deposit and maximum inundation limit // *Marine Geology*. 2015. Vol. 359. P. 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.11.009>
 23. Cheng W., Weiss R. On sediment extent and run-up of tsunami waves // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. Vol. 362. P. 305–309. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.12.004>
 24. Dawson A.G., Long D., Smith D.E. The Storegga slides: evidence from eastern Scotland for a possible tsunami // *Marine Geology*. 1988. Vol. 82. P. 271–276. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90146-6](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90146-6)
 25. Einsele G., Chough S.K., Shiki T. Depositional events and their records – an introduction // *Sedimentary Geology*. 1996. Vol. 104. P. 1–9. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(95\)00117-4](https://doi.org/10.1016/0037-0738(95)00117-4)
 26. Geist E.L., Parsons T. Distribution of tsunami interevent times // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35, L02612. <https://doi.org/10.1029/2007GL032690>
 27. HTDB/WLD: *Historical Tsunami Database for the World Ocean*. URL: <http://tsun.sccc.ru/htdbpac/> (accessed: 15.09.2014).
 28. Jaffe A.E., Gelfenbaum G. A simple model for calculating tsunami flow speed from tsunami deposits // *Sedimentary Geology*. 2007. Vol. 200(3–4). P. 347–361. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.013>
 29. Kaistrenko V. Tsunami recurrence versus tsunami height distribution along the coast // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168(11). P. 2065–2069. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0288-0>
 30. Kaistrenko V. Tsunami recurrence function: Structure, methods of creation, and application for tsunami hazard estimates // *Pure and Applied Geophysics*. 2014. Vol. 171. P. 3527–3538. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0791-1>
 31. Kaistrenko V.M., Pinegina T.K., Klyachko M.A. Evaluation of tsunami hazard for the Southern Kamchatka coast using historical and paleotsunami data // *Submarine Landslides and Tsunamis: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Istanbul, Turkey, 23–26 May 2001* / eds.: A.C. Yalciner, E. Pelinovsky, C.E. Synolakis, E. Okal. Kluwer Publ., Springer, 2003. P. 217–228.
 32. Kastens K.A., Cita M.B. Tsunami-induced sediment transport in the abyssal Mediterranean Sea // *GSA Bulletin*. 1981. Vol. 92(11). P. 845–857. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1981\)92<845:TSTITA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1981)92<845:TSTITA>2.0.CO;2)
 33. Keating B.H. Status of tsunami science research and future directions of research // *Science of Tsunami Hazards*. 2006. Vol. 24(5). P. 285–395.
 34. Keating B.H., Hellsley C.E., Wanink M., Walker D. Tsunami deposit research: Fidelity of the tsunami record, ephemeral nature, tsunami deposits characteristics, remobilization of sediment by later waves, and boulder movements // *The Tsunami Threat – Research and Technology* / ed. by Nils-Axel Mörner. Rijeka, Croatia: InTech, 2011. P. 389–422. <https://doi.org/10.5772/14885>
 35. MacInnes B.T., Bourgeois J., Pinegina T.K., Kravchunovskaya E.A. Tsunami geomorphology: Erosion and deposition from the 15 November 2006 Kuril Island tsunami // *Geology*. 2009a. Vol. 37(11). P. 995–998. doi: <https://doi.org/10.1130/G30172A.1>
 36. MacInnes B.T., Pinegina T.K., Bourgeois J., Razzhigayeva N.G., Kaistrenko V.M., Kravchunovskaya E.A. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the middle Kuril Islands // *Pure and Applied Geophysics*. 2009b. Vol. 166(1–2). P. 3–36 https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0064-4_2
 37. Marinatos S. The volcanic destruction of Minoan Crete // *Antiquity*. 1939. Vol. 13. P. 425–439.
 38. Minoura K., Nakata T. Discovery of an ancient tsunami deposit in coastal sequences of southwest Japan: verification of a large historical tsunami // *Island Arc*. 1994.

- Vol. 3. P. 66–72. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1994.tb00006.x>
39. Minoura K., Nakaya S. Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from northeast Japan // *The Journal of Geology*. 1991. Vol. 99. P. 265–287.
40. Moore G.W., Moore J.G. Deposits from a giant wave on the island of Lanai, Hawaii // *Science*. 1984. Vol. 226. P. 1312–1315. doi:10.1126/science.226.4680.1312
41. Moor J.G., Moore G.W. Large-scale bedforms in boulder gravel produced by giant waves in Hawaii // *Geological Society of America Special*. 1986. Vol. 229. P. 101–110. <https://doi.org/10.1130/SPE229-p101>
42. NGDC: *Tsunami Data and Information*. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml (accessed: 29.09.2019). doi:10.7289/V5PN93H7
43. Oliveira M.A., Andrade C., Freitas M.C., Costa P. Using the historical record and geomorphological setting to identify tsunami deposits in the southwestern coast of Algarve (Portugal) // *2nd Tsunami Field Symposium: Abstract Book*. Ostuni, Italy, 2008. P. 85–88.
44. Paskoff R. Likely occurrence of a mega-tsunami in the Middle Pleistocene, near Coquimbo, Chile // *Revista Geológica de Chile*. 1991. Vol. 18(1). P. 87–91. doi:10.5027/andgeoV18n1-a08
45. Pinegina T., Bourgeois J., Bazanova L., Melekestsev I., Braitseva O.A. Millennial – scale record of Holocene tsunamis on the Kronotskiy Bay coast, Kamchatka, Russia // *Quaternary Research*. 2003. Vol. 59. P. 36–47. [https://doi.org/10.1016/S0033-5894\(02\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S0033-5894(02)00009-1)
46. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Shishkin A.A. Coastal sedimentation associated with the Tohoku Tsunami of 11 March 2011 in South Kuril Islands, NW Pacific Ocean // *Pure and Applied Geophysics*. 2013. Vol. 170(6–8). P. 1081–1102. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0478-4>
47. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Chernov S.B. The Tohoku Tsunami of 11 March 2011: The key event to understanding tsunami sedimentation on the coasts of closed bays of the Lesser Kuril Islands // *Pure and Applied Geophysics*. 2014. Vol. 171(12). P. 3307–3320. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0794-y>
48. Soulsby R., Smith D.E., Ruffman A. Reconstructing tsunami run-up from sedimentary characteristics: A simple mathematical model // *Sixth Intern. Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Process, New Orleans, Louisiana, United States, May 13–17, 2007. Coastal Sediments '07*. New Orleans, 2007. P. 1075–1088.
49. Spiske M., Piepenbreier J., Benavente C., Bahlburg H. Preservation potential of tsunami deposits on arid siliclastic coasts // *Earth Science Reviews*. 2013. Vol. 126. P. 58–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.07.009>
50. Srisutam Ch., Wagner J-F. Reconstructing tsunami run-up from the characteristics of tsunami deposits on the Thai Andaman Coast // *Coastal Engineering*. 2010. Vol. 57. P. 493–499. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.12.001>
51. Szczucin'ski W. The post-depositional changes of the onshore 2004 tsunami deposits on the Andaman Sea coast of Thailand // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 60. P. 115–133. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9956-8>
52. Witter R.C., Jaffe B., Zhang Y., Priest G. Reconstructing hydrodynamic flow parameters of the 1700 tsunami at Cannon Beach, Oregon, USA // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 63. P. 223–240. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9912-7>

Об авторе

КАЙСТРЕНКО Виктор Михайлович (ORCID 0000-0003-1026-2509), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цунами – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.