УДК 551.21

doi: 10.30730/2541-8912.2019.3.2.219-236

Использование палеоданных для оценки цунамиопасности побережья бухты Малокурильская (остров Шикотан)

© 2019 Н. Г. Разжигаева^{*1}, Л. А. Ганзей¹, Т. А. Гребенникова¹, В. М. Кайстренко², А. А. Харламов³, Х. А. Арсланов⁴, Ф. Е. Максимов⁴

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, ²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия ³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия ⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия *E-mail: nadyar@tigdvo.ru

Приводятся данные по отложениям исторических и палеоцунами на побережье одной из населенных бухт о. Шикотан со стороны Южно-Курильского пролива, которая в настоящее время активно осваивается. Цель статьи установить хронологию наиболее сильных цунами, проявившихся здесь в среднем-позднем голоцене, оценить их параметры и повторяемость. В качестве ключевого участка для реконструкций выбрана береговая низменность на правом борту бухты, образованная на месте заросшего палеоозера лагунного происхождения. Привлекались также данные по разрезам голоценовых отложений, отобранных на низменных участках в кутовой части бухты. При идентификации отложений палеоцунами наряду с литолого-фациальными признаками применялся диатомовый анализ. Все цунамигенные пески включают морские и солоноватоводные виды диатомей, преобладают бентосные сублиторальные формы, в небольшом количестве присутствуют планктонные сублиторальные виды и океанические диатомеи, которые заносились из глубоководных участков пролива. Гранулометрический состав цунамигенных песков сильно различается в зависимости от обстановок осадконакопления на побережье: вглубь озера распространялись только более тонкие взвеси; покровы, образованные на поверхности торфяника, имеют более грубый состав и большую мощность. Для отдельных событий есть признаки активной подачи материала со склонов. Возраст палеоцунами определен на основе радиоуглеродного датирования и данных тефростратиграфии. В разрезах озерно-болотных отложений найдены 2 прослоя тефры влк. Тятя и 2 транзитных вулканических пепла, источниками которых были извержения влк. Тарумаи и Масю на о. Хоккайдо. Впервые для района пос. Малокурильск установлена повторяемость сильных цунами за последние ~7240 кал. л., проведено сравнение с результатами, полученными для бухт Хромова, Отрадная, Крабовая и тихоокеанской стороны острова. Доказывается, что палеособытия были более интенсивными, чем известные исторические цунами. Повторяемость крупных цунами, которые оставили осадочные покровы, здесь реже, чем на тихоокеанской стороне острова.

Ключевые слова: палеоцунами, цунамиопасность, голоцен, остров Шикотан, Малая Курильская гряда.

Application of paleodata for evaluation of the tsunami hazard of the Malokurilskaya bay coast (Shikotan Island)

Nadezhda G. Razjigaeva¹, Larisa A. Ganzey¹, Tatyana A. Grebennikova¹, Victor M. Kaistrenko², Andrey A. Kharlamov³, Khikmatulla A. Arslanov⁴, Fedor E. Maksimov⁴

¹Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok ²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk ³P.P.Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow ⁴St. Petersburg State University, St. Petersburg

The data on the geological records of the paleotsunamis on the coast of one of the inhabited bays of Shikotan Island have been represented. The studied area is located on the side of the South Kuril Strait, which is currently being actively developed. The purpose of the article is to establish the chronology of the strongest

Работа выполнена в рамках государственных заданий ТИГ ДВО РАН (АААА-А18-118012290124-5), ИМГиГ ДВО РАН (0285-2019-0004), ИО РАН (0149-2019-0005) и при поддержке программы «Приоритетные научные исследования в интересах комплексного развития Дальневосточного отделения РАН» (проект 18-5-003).

tsunamis that occurred here in the middle-late Holocene, to evaluate their parameters and recurrence. Data on the sections of Holocene deposits, selected on lowland within head of the bay was also attracted. The diatom analysis was used as well as lithological study for identification of paleotsunami deposits. Tsunami sands include marine and brackish-water diatom species, benthic sublittoral forms predominate, the plankton sublittoral species has been found also. Finally, the oceanic diatoms, which came from deepsea straits, have been represented in small numbers. The grain size composition of tsunami sands is very different depending on the sedimentation conditions existing on the coast: only thinner suspensions spread into the lake; sand sheets formed on the surface of the peat bog have a coarser composition and greater thickness. There are signs of active material feed from the slopes during some events. Paleotsunami age has been determined on the base of radiocarbon dating and tephrostratigraphy data. The lacustrine-swamp sequences included 2 layers of Tyatya Volcano tephra and 2 transit volcanic ash, the sources of which were eruptions of Tarumai and Mashu volcanoes, located on Hokkaido Island. The recurrence of strong tsunamis over the last ~7240 cal. has been established at first for the Malokurilsk village area, and the comparison of the obtained results was made with the results for Khromova, Otradnaya, Krabovaya bays and Pacific sides of the island. The paleo-events is proved to be more intense than the historical tsunami. The recurrence of large tsunamis which left sand sheets is less than that on the Pacific side of the island.

Keywords: paleotsunami, tsunami hazard, Holocene, Lesser Kuril Ridge.

Введение

При изучении проявления палеоцунами и повторяемости крупных событий на Малой Курильской гряде основное внимание уделялось тихоокеанскому побережью, где высота заплесков намного выше, чем на берегах Южно-Курильского пролива [Левин и др., 1994; Иващенко и др., 1996; Кайстренко и др., 1997; Шикотанское..., 2015], и разрезы голоценовых отложений включают наиболее подробные геологические летописи событий [Разжигаева и др., 2008, 2017; Nishimura et al., 2009]. В то же время при оценке цунамиопасности побережья особое внимание следует уделять участкам, где располагаются населенные пункты или ведется хозяйственная деятельность [Шевченко и др., 2018]. Данные по палеособытиям позволяют существенно продлить временные ряды крупных цунами и сделать заключение об их возможных масштабах и повторяемости.

На о. Шикотан население сосредоточено в двух поселках: Малокурильском (1873 чел. по данным переписи 2010 г.), расположенном на берегу бухты Малокурильская, и Крабозаводском (население 947 чел.) на берегу бухты Крабовая. Население поселков существенно увеличивается в путину. Большая часть пос. Малокурильское расположена на высоких увалах, в цунамиопасную зону кроме причалов и портов попадают рыбокомбинат «Островной», сеть магазинов и кафе, в вершине бухты есть дома на низких уровнях, в том числе пожарная станция, почта, поликлиника и здание поселковой администрации, здесь расположены мосты и дорога, связывающая отдельные части поселка и идущая в Крабозаводское. Через 10-15 лет после последнего крупного цунами, вызванного Шикотанским землетрясением 1994 г. [Шикотанское..., 2015], низкие участки поселка начали активно осваиваться: появились новые причалы, прошла реконструкция рыбокомбината, отстраиваются новые магазины, сделано хранилище ГСМ. Все это повышает актуальность исследований масштабов проявления цунами в прошлом для прогнозирования потенциальных рисков в будущем. Целью статьи является синтез данных по проявлению палеоцунами на побережье бухты Малокурильской, определение хронологии событий и их повторяемости в среднем-позднем голоцене.

Бухта Малокурильская относится к закрытому типу, имеет округлую форму (1.22 × 0.9 км), узкий вход (320 м) с глубинами до 13.2 м. Изобата 10 м оконтуривает вход в бухту. Максимальная глубина в центральной части бухты с учетом косейсмического погружения во время Шикотанского землетрясения 1994 г. [Иващенко и др., 1996]–около 7–7.5 м. Дно покрыто среднемелкозернистым песком [Лоция..., 1968]. На участках, примыкающих к устьям ручьев, пески заиленные. Входные мысы сложены вулканическими породами матакотанской свиты (верхний мел), борта бухты – осадочными породами малокурильской свиты (верхний мел) [Ковтунович, 2004], менее устойчивыми к абразии. Накопление отложений шло в морском бассейне на глубинах менее 200 м [Гаврилов, Соловьева, 1973]. Отмершие клифы, выработанные в этих породах, окаймляют бухту, прерываясь лишь в устьях ручьев, где расположены небольшие аккумулятивные участки (рис. 1). На пляже много неокатанного материала, что типично для закрытых бухт. В вершине бухты пляж песчаный, на бортах сложен разнозернистым песком с галькой.

Строение бухты во многом обусловливает особенности распространения волн цунами: для акватории характерны собственные резонансные колебания, которые начинаются при возмущении уровня, что усиливает цунамиопасную ситуацию, особенно в кутовой части бухты [Шевченко и др., 2018]. После цунами уровень воды колеблется от нескольких часов



Рис. 1. Участки поиска следов палеоцунами на побережье бухты Малокурильская, о. Шикотан, с указанием положения и номеров разрезов. (а) схема Южных Курил с очагами значимых цунами [Атлас..., 2009]; (б) участок работ на о. Шикотан; (в) вид на бухту Малокурильскую с высоты 412 м; (г) положение изученных разрезов на побережье бухт Малокурильская и Хромова; (д) вид на заболоченную низменность, образованную на месте палеоозера; (е) положение изученных разрезов, вскрывших отложения палеоозера.

Геосистемы переходных зон, 2019, т. 3, № 2, с. 219–236

до суток [Аверьянова и др., 1961; Кайстренко и др., 1997]. Бухта замерзает зимой, поэтому здесь вполне вероятны цунами со льдом, опасные даже при небольших величинах заплеска [Kaistrenko et al., 2013]. Сведения о проявлении цунами и инструментальные наблюдения за уровнем в Малокурильске ограничены второй половиной XX в. С этого времени цунами хорошо задокументированы [Соловьев, 1978; Левин и др., 1994; Иващенко и др., 1996; Кайстренко и др., 1997; Шевченко и др., 2018]. Сильное локальное цунами, очаг которого располагался на западном склоне Курило-Камчатского желоба напротив о. Итуруп, произошло 6 ноября 1958 г., подъем уровня в Малокурильской бухте был до 3.5 м [Аверьянова и др., 1961]. Из трансокеанических цунами ярко проявилось Чилийское 1960 г., заплеск в Малокурильской бухте был до 4 м [Соловьев, 1978]. Во время Шикотанского цунами 1994 г. вертикальный заплеск в районе здания Малокурильской администрации составлял до 2.6 м, зона затопления в вершине бухты была до 70 м, по ручью Отрада цунами проникло до 455 м вглубь суши с высотой заплеска до 3.7 м [Кайстренко и др., 1997]. Высота заплеска Тохоку цунами 2011 г. была до 2.5 м [Кайстренко и др., 2011; Kaistrenko et al., 2013]. Высота заплесков других значимых цунами (1963, 1969, 1975 гг.) не превышала 0.6-1.5 м [Соловьев, 1978; Шевченко и др., 2018].

Материал и методы

Работы по поиску следов палеоцунами в 2006–2009 гг. проводились на побережье бухты Малокурильская на двух участках (рис. 1). На болотном массиве на правом борту бухты ручным бурением была сделана серия скважин по профилю вглубь суши. Для определения высотных отметок проводилось нивелирование с поправкой на приливно-отливные колебания. В вершине был обследован котлован, выкопанный при ремонтных работах на дороге. Опробованы также разрезы (скважины бурения) в долине ручья Отрада за пределами поселка.

Для выяснения хода эрозионно-аккумулятивных процессов и установления источников поступления материала изучен гранулометрический состав осадков с использованием набора сит с шагом γ. Окатанность зерен размерностью >1 мм определялась по классификации Л.Б. Рухина, использовался коэффициент окатанности, принятый в литологических исследованиях [Логвиненко, Сергеева, 1986; Справочник..., 1983].

При идентификации отложений палеоцунами применялся и диатомовый анализ. Подготовка препаратов проведена по стандартной методике [Диатомовые водоросли..., 1974]. Видовой состав диатомовых водорослей определяли при увеличении ×1000 на микроскопе Axioscop с использованием атласов-определителей [Диатомовый анализ, 1950; Krammer, Lange-Bertalot, 1986, 1991]. В препаратах подсчитывалось не менее 250–300 створок. При эколого-географической характеристике диатомей использовались также сведения из работ [Давыдова, 1985; Баринова и др., 2006].

Возраст событий определяли на основе радиоуглеродного датирования, выполненного в Институте наук о Земле Санкт-Петербургского университета, и данных тефростратиграфии. Образцы торфа были предварительно очищены от карбонатов и посторонних гуминовых кислот путем последовательной обработки образцов 2%-ми растворами HCl и NaOH. Калибровка радиоуглеродных дат сделана в программе OxCal 4.3 с калибровочной кривой IntCal 13 [Bronk Ramsey, 2017]. Для установления хронологии событий наряду с данными радиоуглеродного анализа использованы датировки, полученные путем интерполяции в интервале между двумя датированными прослоями. Химический состав вулканического стекла проанализирован в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ проводились на приборе LEO SUPRA 50 VP (Carl Zeiss, Германия) с использованием энергодисперсионного анализатора X-MAX 80 (Oxford Inst., Великобритания).

Для корреляции событий привлекались данные, полученные при изучении разре-

зов отложений палеоозера в бухте Хромова (естественное обнажение в приустьевой зоне ручья) [Nazarova et al., 2017] и в бухтах Отрадная и Крабовая [Razjigaeva et al., 2014].

Результаты и обсуждение

Сложность поиска отложений палеонунами на побережье бухты Малокурильская связана с сильным антропогенным преобразованием берегов. Наиболее информативным объектом оказалась заболоченная низменность (высотой 1.5-2.5 м над ур. м.) на правом борту бухты (рис. 1). В хозяйственную деятельность этот участок практически не вовлекался, хотя была сделана попытка осушить поверхность и использовать территорию под огороды или сенокосы. Застроена пересыпь и участок, примыкающий к правому борту. Низменность представляет собой заросшее палеоозеро-лагуну (ширина до 150 м). Такие обстановки со спокойными условиями седиментации рассматриваются как наиболее благоприятные для сохранения отложений палеоцунами [Sawai, 2002; Sugawara et al., 2008]. Озеро имело удлинен-

бухта

ную форму и протягивалось вглубь суши не менее чем на 400 м. Серия скважин вскрыла здесь отложения общей мощностью до 5.6 м, в нижней части залегает темно-коричневая неслоистая гиттия, перекрытая торфянистым алевритом и торфом (рис. 2). Возраст вскрытых отложений ~ 7240 кал. л. н. В качестве опорного выбран разрез в 200 м от уреза, здесь пробурено 4 скважины и выкопан шурф (глубиной 0.9 м).

Тефростратиграфия. В торфянике обнаружены маркирующие прослои пеплов влк. Тятя: Туа-1 (извержение 1973 г.) и Туа-2 (1288-1558 кал. л. н.), сложенные темно-серым и оливково-серым алевритом, вулканическое стекло имеет андезитовый состав со средним содержанием К₂О. Из торфа под пеплом Туа-2 получена ¹⁴С-дата 1470 ± 100 л. н., 1390 ± 100 кал. л. н. (ЛУ-5915). Ниже встречен вулканический пепел Та-с (2.4-2.5 тыс. кал. л. н.) влк. Тарумаи, о. Хоккайдо, сложенный желтым алевритом. По химическому составу он относится к среднекалийным риолитам. В основании торфяника встретился рассеянный

806 24007 24107 11006 25807 11508 11608 1406 0 м <u>0</u>м 0м 0м 0м Ts-1 Ts-2 Tva-1 Ts-3 Tya-2 Tvā-2 Ts-4 Ta-e-Ta-c Ta-c Ts-5 Ts₇6 1 1 1 1 1 Ta-c 2760±100 ЛУ-5742 Ts Ts-7 3160±100 ПУ-5754 Ts-8 Ts-8 920±110 У-5753 Ma-d 2 2 2 2 2 Ts-9 ~ Ts-9 Ts-10 3 Ts-11 $\overline{}$ Ts-12 $\overline{}$ Ts-13 1508 1608 1406 24007²⁵⁸⁰⁷ 1006 806. □ 4760±160 JIV-5744 4 4 ≥ 3 BLCOTA, Ts-14 5 0 50 100 150 200 250 300 350 M Расстояние от уреза, м Ts-15 - 6

Рис. 2. Разрезы отложений палеоозера с прослоями цунамигенных песков на побережье бухты Малокурильская и профиль с указанием положения разрезов.

 цунамигенный среднеи мелкозернистым песок,
цунамигенный разнозернистый песок,

- 3 гравий,
- 4 галька,
- 5 дресва,
- 6 алеврит,
- 7 гиттия,
- 8 торф,

9 – вулканический пепел. ЛУ-5742 и далее – лабораторные индексы ¹⁴С-дат, полученных в Институте наук о Земле СПбГУ.

Геосистемы переходных зон, 2019, т. 3, № 2, с. 219–236

пемзовый песок – вулканический пепел Ma-d (3840–4150 кал. л. н.) влк. Масю, о. Хоккайдо, который имеет дацитовый низкокалийный состав. Эти вулканические пеплы представлены и в других опорных разрезах голоцена о. Шикотан [Nishimura et al., 2009; Razzhigaeva et al., 2016].

Эволюция озера по данным литостратиграфии и диатомового анализа. Озеро образовалось при подъеме уровня моря в среднем голоцене в устьевой части долины небольшого ручья. Водоем был довольно обширным, но мелководным, диатомовая флора здесь богатая по численности видов и обилию створок. Выделяется две пачки отложений с характерными комплексами диатомей, фиксирующих смену обстановок осадконакопления от озерно-лагунных к озерным и болотным.

В гиттии (инт. 3.00-5.61 м) список диатомей насчитывает 164 таксона пресноводных и 74 морских и солоноватоводных видов. Видовой состав пресноводной флоры по разрезу практически не меняется. Одной из особенностей пресноводных диатомей является высокая продуктивность (79.9 млн створок на 1 г осадка). Такое обилие диаобрастаний томей обеспечивают вилы (60-80 %), характерные для мелководных водоемов с водной растительностью. Преобладают мелкоклеточные формы родов Staurosira, Staurosirella, Pseudostaurosira. Участие донных видов не превышает 20 %, а планктонных 2-5 %. Большинство видов космополиты. По отношению к минерализации преобладают индифференты (до 77 %) и галофилы (до 20 %), а по отношению к рН среды доминируют алкалифилы (до 83 %). Доминирующее ядро комплекса представляют эпифиты Staurosira venter (50-60%), S. subsalina (до 9%), Staurosirella pinnata (до 5 %), Epithemia sorex (до 7 %), *E. turgida* (до 4 %). Постоянно присутствуют донные Navicula radiosa, N. lanceolata, N. rhynchocephala, N. rhynchotella, N. meniscus, Craticula halophila, обрастатели Planothidium lanceolatum, Cymbella tumida, C. tumidula и др., а также типичные реофилы: Odontidium hyemale, Meridion circulare, Rhoicosphenia abbreviata, Fragilaria rumpens. Участие морских и солоноватоводных диатомей в отложениях сильно варьирует. На начальном этапе развития озера ~7240-6630 кал. л. н. обстановки были приближены к лагунным, а климатические условия были наиболее теплыми. Здесь (инт. 5.05-5.60 м) встречены характерные для хорошо прогреваемых лагун или закрытых бухт Campylodiscus echeneis, С. clypeus, Achnanthes brevipes, а также более разнообразны и обильны представители рода Tryblionella (T. punctata, T. coarctata, compressa, T. lanceola, Т. lanceola Т. var. minutula, T. granulata).

В отдельных интервалах (3.30-3.60 м, 3.90-5.05 м) в небольшом количестве (до 3-4 %) присутствуют только солоноватоводные формы (не более 10), значительно снижается обилие их створок (0.5-1.0 млн на 1 г осадка). По-видимому, в эти периоды уровень моря был довольно низким, приток морских вод в озеро минимальным, а в периоды максимального снижения уровня моря он, возможно, прекращался совсем. Температура воды во время формирования этих отложений (5400-6630 кал. л. н.; 4900-4730 кал. л. н.), вероятно, снижалась, на что может указывать увеличение численности в составе пресноводной флоры арктобореальных и бореальных видов, таких как Cavinula pseudoscutiformis, Placoneis clementis, Cymbella tumidula, Gomphonema gracile.

В приустьевой зоне ручья лагуна была сильно распресненной. Соленость определяют такие виды, как солоноватоводные бентосные Melosira lineata, Nitzschia sigma, Pseudofallacia tenera, солоноватоводнопресноводный планктонный Thalassiosira bramaputrae.

В позднем голоцене озеро начало активно заболачиваться. Среди диатомей появляются разнообразные представители родов *Pinnularia* (18 форм) и *Eunotia* (14 форм), характерные для болотных ассоциаций. Их содержание постепенно растет вверх по разрезу, в то время как богатство видов родов *Fragilaria, Cymbella* и *Navicula* снижается, практически исчезают пресноводно-солоноватоводные *Epithemia adnata, E. turgida, E. sorex.* Существенные изменения в структуре комплекса диатомей отмечены в инт. 0-1.5 м. Ведущими становятся донные виды (до 76 %), по отношению к рН среды значительно возрастает участие циркумнейтральных диатомей (до 40 %) и ацидофилов (до 20 %). Значительную долю занимают представители родов Pinnularia (до 33 % в сумме) и *Eunotia* (до 10 %). Более высоким становится участие арктобореальных диатомей за счет появления таких видов, как Pinnularia nodosa, P. borealis, Humidophila contenta, Odontidium mesodon. В кровле разреза (инт. 0-0.09 м) резко сокращается численность видов (44 таксона), обнаружено довольно большое число форм, хорошо переносящих временные осушки Pinnularia Hantzschia amphioxys, borealis. Eunotia praerupta. Такие изменения в составе пресноводной флоры показывают постепенное обмеление, заболачивание и полную деградацию озера. В глубине болота в торфе встречаются слои зеленовато-серых суглинков с рассеянным песком, образованные в экстремальные наводнения. Они включают только пресноводные диатомеи.

Отложения палеоцунами, хронология и корреляция событий. В верхней части разрезов в 200 м от уреза найдено три тонких (до 1 см) прослоя средне-мелкозернистых хорошо сортированных песков (рис. 2).

Верхние два, вероятно, оставлены наиболее крупными цунами XX в. (Тв 1-2). В первом песке (предположительно, цунами 1994 г.) встречается окалина, бутылочное стекло, во втором - уголь, что явно свидетельствует о переработке антропогенного материала при прохождении цунами. Уголь обильно встречается и в осадках современного пляжа. Величина горизонтального заплеска в этой части бухты была около 210 м [Кайстренко и др., 1997]. Один из прослоев песка (Ts 2), залегающий в виде гнезд под слоем пепла Туа-1, прослеживается до 250 м вглубь суши (возможно, оставлен цунами 1958 или 1960 г.) (разрезы 11006, 25807). Для песков характерны бимодальные гранулометрические кривые распределения (моды 0.2-0.25; 0.315-0.4 мм), есть примесь гравия (4.5-6.9 %) и алеврита (до 2.4 %). В верхнем найдена мелкая галька (до 1.2 мм). Среди крупных зерен

преобладают (55–60 %) неокатанные, которые могли захватываться не только с пляжа и приурезовой зоны, но и с грунтовой дороги. Хорошо окатанные зерна (3 класс) составляют 5.5–12.8 %, коэффициент окатанности 0.55–1.0. В целом седиментологические ситуации и источники материала были сходными. В верхнем песке найден сублиторальный вид *Thalassiosira bramaputrae* (2.2 %), характерный для распресненных лагун. Во втором прослое песка встречены сублиторальные: планктонный *Actinocyclus octonarius* (0.5 %) и бентосный *Cocconeis costata* (0.5 %), характерные для лагун и заливов.

Песок на глубине 0.43 м может быть следом цунами, произошедшего ~1000 л. н. (Тѕ 3). В осадке единично встречены створки планктонного солоноватоводного *Thalassiosira bramaputrae*. Высота заплеска в бухте Малокурильская была более 2 м, зона затопления не менее 200 м. Цунамигенные пески этого возраста найдены в соседних бухтах Хромова (¹⁴С-дата 1030 ± 80 л. н., 950 ± 100 кал. л. н., ЛУ-6578), Отрадная (¹⁴С-дата 1010 ± 100 л. н., 930 ± 100 кал. л. н., ЛУ-7098) и широко распространены с тихоокеанской стороны острова и на других островах Малой Курильской гряды [Разжигаева и др., 2008, 2017].

Между пеплами Туа-2 и Та-с найден один прослой мелкозернистого песка (Ts 4). Кривая распределения одномодальная (мода 0.2-0.25 мм), сходная по структуре с кривой осадка осушки. Материал поставлялся в основном со дна бухты. Примесь гравия крупнозернистого песка минимальная И (1.2 и 2.3 %). Среди зерен >1 мм преобладают неокатанные разности (64.3 %), коэффициент окатанности 0.36. В отложениях найдены бентосные Synedra kamtschatica, Cocconeis scutellum, C. costata, Tryblionella plana, Navicula peregrina и фрагменты глубоководных Coscinodiscus aff. oculus-iridis, Thalassiosira sp., Thalassiosira aff. eccentrica. Возраст цунами Ts 4 может быть оценен ~2080 кал. л. н. Горизонтальный заплеск был не менее 200 м. Отложения палеоцунами аналогичного возраста найдены в бухте Хромова [Nazarova et al., 2017] и на побережье бухты Аэродромная (2050 ± 80 л. н.,

2030 ± 110 кал. л. н., ЛУ-5586) [Разжигаева и др., 2008].

Хорошо выраженные слои песка встречены ниже вулканического пепла Та-с (2.4–2.5 тыс. кал. л. н.). В опорном разрезе 806 (11006) в 200 м от берега насчитывается до 11 таких слоев, представленных зеленовато-серыми песками, часто с примесью гравия разной степени окатанности и редкой дресвой.

Непосредственно под пеплом Та-с встречено 2 прослоя мелкозернистых песков (Тs 5-6). Материал первого слоя (мощность 1 см) хорошо сортирован, сходен с песком осушки, переотложение его происходило с приурезовой зоны. Гравия мало (0.3 %), практически весь окатан (коэффициент окатанности 1.67). Расчетный возраст палеоцунами Ts 5 ~ 2560 кал. л. н. Второй слой (мощность 2 см) представлен разнозернистым песком с гравием (до 12.7 %). Кривые распределения полимодальные (моды 0.2-0.25; 0.315-0.4; 0.4-0.5; 2-3 мм). Основными источниками материала были подводный береговой склон и пляж, активно эродированы барьерная форма и склоны. Много хорошо окатанного гравия уплощенной формы (с окатанностью 3-4 класса – 14.3 %), коэффициент окатанности (1.12) близок к осадкам современного пляжа. Возраст палеоцунами Ts 6 ~ 2650 кал. л. н. На побережье бухты Малокурильская эти цунами по интенсивности были сходны с крупными цунами XX в. Следы близких по возрасту цунами обнаружены на юге в бухте Димитрова в 320 м от береговой линии. Под нижним слоем песка получена ¹⁴С-дата 2550 ± 80 л. н., 2610 ± 110 кал. л. н., ЛУ-5942 [Разжигаева и др., 2008].

Два нижележащих слоя наиболее представительны и имеют мощность от 23 см (верхний) до 63 см (нижний). Такие мощные слои песков могли оставить только цунами, сопровождавшиеся активной эрозией [Пинегина, 2014; Goto et al., 2019] и, по-видимому, наиболее интенсивно проявившиеся в бухте в среднем-позднем голоцене. Озеро к этому времени сильно заросло и представляло топь с мелким водоемом. В скважинах 11006 и 24007 верхний песок разделен на два слоя. Структура отложений сходная. Возможно, здесь встречены отложения двух цунами (Ts 7, Ts 8), или же песок включает переотложенный фрагмент торфа (толщиной до 10 см), что типично для крупных цунами, сопровождавшихся сильной эрозией [Dawson, Stewart, 2007]. Структурные характеристики осадков похожи (рис. 3), но в пользу двух отдельных событий говорит корреляция разрезов (11508, 11608), вскрытых в глубине болота, где этот слой явно разделен на два. Пески включают редкую хорошо окатанную гальку (до 2.5 см) и гравий (7.9 %). Среди зерен >1 мм содержание хорошо окатанного материала 3-4 класса достигает 10.3 %, коэффициент окатанности 0.90. Основным источником песка были приурезовые фации и пляж (пропорция ~ 2 : 1); вероятно, происходила и эрозия склонов. В разрезе 11608 в песке найдены сублиторальные морские планктонные Paralia sulcata, Actinocyclus octonarius, бентосные Amphora proteus, Cocconeis costata, C. interrupta, Petroneis marina, Rhabdonema arcuatum, Grammatophora oceanica, Campylodiscus neofastuosus, Pinnunavis varrensis, Tryblionella acuminata, Т. compressa, солоноватоводные Cocconeis scutellum, Ctenophora pulchella, Rhopalodia musculus, Tabularia fasciculata, Campylodiscus bicostatus, Nitzschia sigma, Planothidium hauckianum, Diploneis interrupta. Встречены и фрагменты глубоководных Thalassiosira sp., Coscinodiscus sp. Зона затопления была более 310 м. Из торфа над слоем песка Ts 7 получена ¹⁴С-дата 2760 ± 100 л. н., 2900 ± 120 кал. л. н., ЛУ-5742. Близкие по возрасту отложения палеоцунами датированы в южной части бухты Димитрова: ¹⁴С-дата 2700 ± 40 л. н., 2810 ± 40 кал. л. н., ГИН-13029 [Разжигаева и др., 2008].

Слой, оставленный палеоцунами Ts 8, сложен средне-мелкозернистым песком (рис. 3) Кривые распределения бимодальные (моды 0.2–0.25 и 0.315–0.4 мм), что отражает поставку материала с пляжа, осушки и с подводного берегового склона. Отложения включают хорошо окатанный гравий и мелкую гальку (до 1.5 см) и плохо окатанный материал, который мог захватываться около клифа или за счет эрозии склоновых отложений. На современном пляже доля неокатанных зерен (>1 мм) – 38.7 %. Об активной поставке материала с подводного склона говорит и высокое содержание алеврита (до 11.4 %), которого практически нет на пляже. Алеврит переносился со дна бухты с участков накопления заиленных песков, приуроченных к зонам смешения. Примесь частиц >1 мм также максимальная в нижней части слоя (до 14.7 %), большая часть частиц (77.5 %) не окатаны. Выше по разрезу доля грубого материала снижается до 2.7–1.4 % и растет в кровле до 8.7 %. Здесь большая часть зерен (43.8–58 %) также не окатана и, вероятно, перенесена со склона или участков вблизи клифов, остальные (до 29 %) имеют окатан-

ность 2-3, реже (<5 %) 4 класса и поставлялись с пляжа. Коэффициент окатанности 0.27-0.88 (на пляже 1.13). Сортировка материала хуже, чем на современных пляже и осушке, особенно в основании слоя. Структура песков фиксирует прохождение нескольких волн цунами, которые переоткладывали материал из разных источников в разных пропорциях. Первая волна была наиболее сильная, вызвала более активную эрозию клифа, склонов и дна бухты; последующие волны захватывали материал с пляжа и подводного берегового склона (в пропорции ~ 1 : 3), а заключительная, вновь более интенсивная, поставила больше гравийно-галечного материала с пляжа и пересыпи, происходила также и эрозия склонов. В целом кривые распределения близки по форме и хорошо выдержаны по разрезу. Песок прослеживается на расстояние до 310 м от береговой линии.

Прослой песка включает большое количество морских диатомей (до 21 %, 31 таксон) с преобладанием сублиторальных бентосных видов, таких как морские *Petroneis* granulata, Hyalodiscus scoticus, Tryblionella acuminata, солоноватоводные Cocconeis scutellum (до 2.5 %), Planothidium hauckianum, Campylodiscus bicostatus, C. echeneis, Diploneis smithii var. pumila, D. smithii var. rhombica (до 1.1 %), D. pseudovalis, Mastogloia smithii, Pseudofallacia tenera, Tryblionella littoralis, T. levidensis, Nitzschia sigma, Rhopalodia musculus, Ctenophora pulchella. Из планктонных видов найдены морские Actinocyclus octonarius, Hyalodiscus obsoletus, Paralia sulcata (до 1.3 %), Thalassiothrix longissima и солоноватоводный Thalassiosira bramaputrae (до 2.5 %).

Судя по набору бентосных видов, большинство которых обитает до глубин 5–7 м [Рябушко, 2014], основную часть материала цунами захватывало со дна бухты.



Рис. 3. Гранулометрические кривые распределения цунамигенных песков (содержание и окатанность зерен >1 мм) в опорном разрезе 806 (11006).

Фракции: 1 <0.05; 2 – 0.05–0.063; 3 – 0.063–0.08; 4 – 0.08–0.1; 5 – 0.1– 0.125; 6 – 0.125–0.16; 7 – 0.16–0.2; 8 – 0.2–0.25; 9 – 0.25–0.315; 10 – 0.315–0.4; 11 – 0.4–0.5; 12 – 0.5–0.63; 13 – 0.63–0.8; 14 – 0.8–1; 15 – 1–1.25; 16 – 1.25–1.6; 17 – 1.6–2; 18 – 2–3; 19 – 3–4; 20 – 4–5 мм. Обнаружены и такие бентосные виды, как Halamphora coffeiformis, Diploneis smithii, Fallacia forcipata (до 1.2 %), способные обитать на глубинах более 17 м [Рябушко, 2014], которые могли быть принесены из пролива. Единично (до 1 %) встречены океанические Thalassiothrix longissima, Coscinodiscus oculus-iridis, занесенные с глубоководной части пролива.

Из торфа над цунамигенным песком получена $^{14}\text{C}\text{-дата}\ 3160 \pm 100$ л. н., 3370 \pm 130 кал. л. н., ЛУ-5754, из нижележащего торфа – 3320 ± 110 л. н., 3570 ± 130 кал. л. н., ЛУ-5753. В отложениях палеоозера бухты Хромова найдены 2 слоя цунамигенных песков, под которыми получены ¹⁴С-даты 3200 ± 60 л. н., 3430±70 кал. л. н., ЛУ-6892 и 3390 ± 50 л. н., 3640±70 кал. л. н., ЛУ-6895. Близкие по возрасту отложения палеоцунами датированы на тихоокеанской стороне острова: в южной части бухты Димитрова ¹⁴С-дата 3340 ± 40 л. н., 3570 ± 60 кал. л. н., ГИН-13030, в бухте Аэродромная – 3180 ± 90 л. н., 3400 ± 110 кал. л. н., ЛУ-5590; 3370 ± 100 л. н., 3630 ± 120 кал. л. н., ЛУ-5759 (здесь заплеск был более 600 м, высота более 5 м) [Разжигаева и др., 2008].

В разрезе 1506 к цунами Ts 8 относится слой мелкозернистого хорошо сортированного песка (мощность 2 см), залегающий ниже прослоев вулканических пеплов Туа-2 и Та-с (рис. 2). Состав пресноводных диатомей характеризует условия умеренно заболоченной речной долины. Отмечается высокое богатство озерно-реофильных видов, среди которых доминирует Planothidium lanceolatum, сопутствующими являются Reimeria sinuata, Staurosira venter. Fragilaria vaucheriae. Stauroforma exiguiformis, Meridion circulare, Rhoicosphenia abbreviata и др. Второстепенное место занимают диатомеи, характерные для умеренно увлажненных с признаками заболачивания мест. Среди них доминирует Pinnularia lagerstedtii, присутствуют Eunotia bidens, Е. praerupta, почвенных диатомей мало, присутствуют Hantzschia amphioxys, Humidophila contenta, Pinnularia borealis. В слое песка и на контакте в торфе список морских и солоноватоводных диатомей включает 20 таксонов. Наряду с вымер-

шим Eupyxidicula zabelinae найдены целые створки и фрагменты морских планктонных Thalassiosira gravida, Coscinodiscus sp., Thalassiosira sp., Actinocyclus octonarius, *A. ochotensis, Paralia sulcata*, бентосные Cocconeis costata, C. verrucosa, Petroneis marina, Rhabdonema arcuatum, Tryblionella plana, солоноватоводные Diploneis smithii var. rhombica, D. pseudovalis, Pinnunavis varrensis. *Cocconeis* scutellum, Navicula peregrina, Rhopalodia musculus, Planothidium hauckianum, Tryblionella victoriae и планктонный Thalassiosira bramaputrae. Особенно часто встречается Paralia sulcata, что характерно для песков Ts 8. Песок в основании торфяника содержит только фрагменты вымерших Eupyxidicula (Pyxidicula) zabelinae, Stephanopyxis sp., Thalassiosira aff. gravida f. fossilis и виды широкого возрастного лиапазона Thalassiosira aff. Coscinodiscus asteromphalus, eccentrica. Coscinodiscus sp., найденные в морском плиоцене о. Шикотан [Терехов и др., 2011] и, повидимому, переотложенные ручьем.

Иное строение имеет нижний мощный слой цунамигенного песка, отвечающий более масштабному событию Ts 9 и, возможно, подходу нескольких волн (рис. 2, 3). Большая часть сложена разнозернистым песком с преобладанием мелкопесчаной фракции (36.2-49.1 %). Кривые распределения полимодальные (моды 0.1-0.125; 0.2-0.25; 0.315-0.4; 0.5-0.6 или 0.63-0.8 мм). Содержание алеврита здесь выше, чем в верхнем слое (до 13.9 %). В основании встречается дресва, есть прослои, обогащенные хорошо окатанным гравием (до 7-8 мм). Повидимому, первая волна цунами вызывала сильную эрозию дна бухты, проявившуюся на обширных участках и охватывающую поля разных по зернистости осадков. В результате отложения имеют такой широкий гранулометрический спектр. Алеврит и мелкопесчаные фракции поставлялись в основном со дна; пик в области среднезернистого песка отвечает пляжевой фации. Присутствие большого количества неокатанного крупного материала (зерна >1 мм составляют до 7.9 %; 94.1 % их не окатаны, коэффициент окатанности 0.06-0.16) свидетельствует, что происходила активная эрозия клифов и склона. Это характерно для крупных цунами с большими зонами затопления и высокой скоростью потока, который был способен разрушить склон и коренные породы и перенести материал вглубь суши [Goto et al., 2019]. В верхней части песок становится более сортированным, кривая распределения – бимодальная (моды 0.2-0.25; 0.315-0.4 мм), по-видимому, последующая волна переносила в основном материал с приурезовой части, осушки и пляжа. Доля неокатанных зерен несколько уменьшилась (до 72.2 %), коэффициент окатанности вырос (до 0.33). Здесь снижается и количество алеврита (8.5 %). Кровля слоя сложена мелкозернистым песком (66 %) с одномодальной кривой распределения (мода 0.2-0.25 мм), сходным по составу с материалом на осушке и прибрежно-морскими осадками на небольших глубинах. По-видимому, интенсивность волны была намного меньше. Количество грубого материала (>1 мм) резко снижается (0.44 %). О том, что в заключительную фазу цунами поставлялся в основном материал со дна бухты, свидетельствует и увеличение количества морских диатомей – до 11-12. 8 % (в нижней части слоя – 3.5–6.3 %).

Песок включает морские и солоноватоводные диатомеи (до 12.8 %) с преобладанием сублиторальных бентосных видов. Из морских встречены Petroneis granulata, Grammatophora oceanica, Tryblionella acuminata, Fallacia forcipata, из солоноватоводных – Planothidium hauckianum (до 5.6 %), Pseudofallacia tenera (до 1.7 %), Halamphora coffeiformis, Caloneis westii, Cocconeis californica, C. scutellum, C. verrucosa, Diploneis pseudovalis, D. smithii var. pumila, D. smithii, D. smithii var. rhombica, Ctenophora pulchella, Mastogloia elliptica, M. smithii, Melosira lineata, Tryblionella lanceola, T. levidensis, Nitzschia dubia, N. sigma, Rhopalodia musculus. Планктонные виды представлены солоноватоводным Thalassiosira bramaputrae (до 1.7 %), обитавшим, вероятно, в зонах смешения, и морскими Actinocyclus octonarius, Thalassiosira sp. Встречен переотложенный вымерший вид Neodenticula kamtschatica. В одновозрастном слое разнозернистого песка с гравием (встречается хорошо окатанный

до 1 см) в разрезе 11608 найдены характерные для лагун, эстуариев солоноватоводные бентосные Mastogloia smithii, Ctenophora pulchella, Rhopalodia musculus, Navicula peregrina, Pseudofallacia tenera и планктонный Thalassiosira bramaputrae, а также небольшой корродированный фрагмент переотложенного океанического Coscinodiscus sp.

Расчетный возраст слоя песков, оставленных цунами Тs 9, с учетом скоростей торфонакопления составляет ~3840–3890 кал. л. н. Это согласуется с данными по тефростратиграфии – в 1 см выше по разрезу выходит пепел Ма-d (3840–4150 кал. л. н.). В южной части бухты Димитрова датировано палеоцунами 3650 ± 80 л. н., 3970 ± 115 кал. л. н., ЛУ-5943, также оставившее мощный слой песка.

Из гиттии на глубине 3.95-4.0 м получена ¹⁴С-дата 4760 ± 160 л. н., 5460 ± 200 кал. л. н., ЛУ-5744. С учетом скоростей накопления озерных отложений расчетный возраст цунамигенных песков (Ts 10–15) составляет около 4330-4370 кал. л. н.; 4540; 4860-4890; 5130; 5934; 7160 кал. л. н. Все цунами распространялись в озеро. По-видимому, большая часть обломочного материла, который переносился волнами цунами в озеро, отлагалась сразу за барьером, а вглубь водоема распространялись только более тонкие фракции. Данные распределения диатомей показывают, что цунами вызывали активный размыв пересыпей, количество морских и солоноватоводных видов в озерных осадках, накапливающихся сразу после событий, возрастает.

Прослой среднезернистого песка с гравием (до 10.1 %) и небольшой примесью алеврита (3.4 %), образованный ~4330-4370 кал. л. н. (Тѕ 10), имеет мощность до 5 см. Отложения характеризуются одномодальной кривой распределения (мода 0.315-0.4 мм) с выраженным плечом в области мелкого песка (0.2-0.25 мм), что отвечает смеси материала пляжа и осушки в близких пропорциях. Большая часть (65 %) грубого материала плохо окатана и, вероятно, поставлялась за счет эрозии склона, доля хорошо окатанного гравия 5.7 %. В отложениях, включающих цунамигенный песок, содержание морских и солоноватоводных диатомей повышается до 11.3 %. Преобладают сублиторальные бентосные Melosira lineata (2.9 %), M. nummuloides, Cocconeis scutellum, Diploneis pseudovalis, D. smithii var. pumila, D. smithii, Ctenophora pulchella, Pinnunavis varrensis, Pseudofallacia tenera, Nitzschia dubia, Tryblionella littoralis, T. levidensis, Nitzschia sigmoidea, Tabularia fasciculata. Планктонные включают Actinocyclus octonarius, Thalassiosira bramaputrae. Найдены также океанические виды (1 %), целые створки и фрагменты: Thalassiosira eccentrica, T. leptopus, Coscinodiscus perforatus, Coscinodiscus sp. В это время озеро представляло собой распресненную лагуну. Связь с морем, вероятно, увеличилась в малоамплитудную трансгрессию [Sakaguchi, 1983], сопоставляемую с оптимумом суббореала. Возможно, во время цунами была частично разрушена барьерная форма. Зона затопления превышала 250 м. На берегу бух. Хромова датированы цунамигенные пески близкого возраста: 3860 ± 90 л. н., 4270 ± 130 кал. л. н., ЛУ-6473.

Разнозернистые цунамигенные пески, оставленные палеоцунами Ts 11, характеризуются полимодальной кривой распределения (моды 0.1-0.125; 0.2-0.25; 0.315-0.4; 1.25-1.6 мм). Довольно высока примесь зерен >1 мм (11.8%), наряду с неокатанными зернами (34.7 %) встречается и хорошо окатанный гравий (15.5 %). Коэффициент окатанности (1.03) близок к материалу осушки. Седиментологическая ситуация была близка к цунами Ts 9, произошедшему ~3840-3890 кал. л. н., но большая часть грубого материала переносилась с моря. В отложениях отмечен пик морских и солоноватоводных диатомей (до 22 %). Обнаружено много створок сублиторальных бентосных Tryblionella levidensis (1.4%), Mastogloia smithii (2.2%), встречены неритические Chaetoceros didymus, Thalassiosira hyalina и океанические Rhizosolenia setigera, Coscinodiscus sp. (в сумме до 0.9 %), отсутствующие в подстилающих и перекрывающих отложениях. Цунами произошло ~4540 кал. л. н., оно распространялось в распресненную лагуну. Слой песка с гравием прослеживается до 250 м вглубь суши. На побережье бухты Хромова обнаружен цунамигенный песок близкого возраста (4190±170л.н.,4730±240 кал.л.н.,ЛУ-6565).

На тихоокеанской стороне острова в это время (4200 \pm 120 л. н., 4730 \pm 170 кал. л. н., ЛУ-5591) зафиксировано одно из наиболее интенсивных палеоцунами: вертикальный заплеск в бухте Аэродромная был >5 м, зона затопления – >600 м. Близкие по возрасту слои цунамигеных песков есть и на других участках побережья бухты Димитрова [Разжигаева и др., 2008].

Песок, образованный палеоцунами Ts 12 (~4860-4890 кал. л. н.), мелко-среднезернистый, представляет собой смесь материала с пляжа и осушки в близкой пропорции. Кривые распределения бимодальные (моды 0.2-0.25 и 0.315-0.4 мм). Среди зерен >1 мм, составляющих 1.6 %, много неокатанных (59.3 %, коэффициент окатанности 0.59), что свидетельствует об эрозии склонов. Озерные отложения, включающие песок в разрезе 806, по составу диатомей мало отличаются от ниже- и вышележащей толщи. Отложения включают солоноватоводные планктонный Thalassiosira bramaputrae и бентосные Melosira lineata, Tryblionella littoralis, T. levidensis, Ctenophora pulchella, D. smithii var. pumila, а также бентосные Halamphora coffeiformis, Nitzschia sigma, Tabularia fasciculata и океанический Thalassiosira eccentrica, которых нет в ниже- и вышележащих отложениях. Сумма содержания морских и солоноватоводных диатомей 4.4 %. Цунами мало повлияло на развитие озера.

Песок хорошо прослеживается по простиранию (рис. 2). В разрезе 11608 в слое песка найдены бентосные солоноватоводные *Caloneis brevis* var. *elliptica* и *Cocconeis scutellum, Ctenophora pulchella, Navicula peregrina, Diploneis pseudovalis, Tryblionella levidensis, Melosira moniliformis,* планктонный *Thalassiosira bramaputrae.* Заплеск во время цунами был >310 м. Близкое по возрасту событие выделено для побережья бухты Димитрова (4440 \pm 120 л. н., 5090 \pm 170 кал. л. н., ЛУ-5582, 4420 \pm 100 л. н., 5070 \pm 150 кал. л. н., ЛУ-5575), зона затопления была >560 м.

В 200 м от берега встречен тонкий прослой мелкозернистого песка (Ts 13) с одномодальной кривой распределения (мода 0.2–0.25 мм), с небольшим плечом в области 0.315–0.4 мм. Отложения представляют собой смесь материала приурезовых фаций и пляжа. Гравийной фракции 1.3 %. Большая часть зерен (53.8 %) не окатана и поставлена за счет эрозии склона. Цунами Ts 13 распространялось в лагуну. Содержание морских и солоноватоводных видов во вмещающих отложениях достигает 35 %. Перенос материала с небольших глубин объясняет и пик содержания *Cocconeis scutellum* (13.4 %). Возраст события оценивается ~5130 кал. л. н. Близкие по возрасту цунамигенные пески были обнаружены на побережье бухты Димитрова.

Особенно много морских и солоноватоводных диатомей в озерных отложениях стало после прохождения палеоцунами Ts 14 ~5934 кал. л. н. (до 24.1 %), что, возможно, связано с косейсмическим опусканием. Среди доминант помимо солоноватоводного *Thalassiosira bramaputrae* (2.5 %) стало много Melosira lineata (до 8.8 %), способного переносить сильное распреснение. Волны цунами занесли также неритический Thalassiosira gravida и фрагменты океанического Coscinodiscus sp. Песок мелкозернистый, кривая распределения близка к одномодальной (мода 0.2-0.25 мм), осложненная небольшим пиком во фракции 0.1-0.125 мм, асимметричная за счет тонких фракций. Содержание алеврита 11.2 %. Основным источником было дно бухты. Все зерна >1 мм не окатаны, но малая доля крупных фракций (<0.4 %) предполагает, что не было активной эрозии склона и барьерной формы. Вероятно, во время этого же цунами образовался слой песка и в отложениях берегового озера в бухте Хромова, датированный ~5260 ± 140 л. н., 6040 ± 160 кал. л. н., ЛУ-6472. На тихоокеанском побережье событие близкого возраста зафиксировано в разрезах торфяников закрытой долины в центральной части бухты Димитрова, заплеск был >300 м вглубь суши.

Отложения наиболее древнего палеоцунами Ts 15 (~7160 кал. л. н.) по структуре и составу сильно отличаются от вышележащих цунамигенных песков. Кривая распределения бимодальная, мода 0.2–0.25 мм совпадает с приурезовыми фациями, вторая мода 0.63–0.8 мм свидетельствует, что с пляжа захватывался более грубый материал, чем

в вышележащих слоях. Преобладают крупнопесчаные фракции (37 %), доля гравия – 9.3 %. Причем, в отличие от вышележащих отложений, где крупные фракции сложены обломками малокурильской свиты, здесь много обломков вулканитов матакотанской свиты, которые перенесены цунами с участков, прилегающих к входным мысам. Среди частиц >1 мм преобладает неокатанный материал (64 %), коэффициент окатанности 0.40. Цунами прошло на начальном этапе формирования бухты при затоплении нижней части речной долины во время голоценовой трансгрессии. Седиментологическая ситуация, возможно, отличалась от современной. Лагуна была более открытой, доля морских диатомей 10-16 %. В пробе с цунамигенным песком сумма морских и солоноватоводных диатомей 26.6 % (41 вид). Здесь выше содержание видов, характерных для заливов: Paralia sulcata (1.7 %), Hyalodiscus scoticus (1.2 %), из бентосных – Cocconeis scutellum (2 %), Diploneis pseudovalis (2.9 %), Pinnunavis yarrensis (1.2 %), Pseudofallacia tenera (2 %), выше и содержание солоноватоводных Thalassiosira bramaputrae (2 %). Намного выше богатство литорального бентоса. Отложения цунами близкого возраста обнаружены в разрезах наиболее древнего торфяника в закрытой долине на берегу бухты Димитрова.

В более удаленной от берега скважине 1406 вскрыты три слоя песков, залегающих ниже прослоя вулканического пепла Та-с (рис. 2). Точка находится ближе к склону и палеоустью ручья (рис. 1), и седиментологическая ситуация здесь была несколько иная, поэтому корреляция событий, зафиксированных здесь и в разрезах 806-11608, затруднена. В инт. 2.63-2.03 м найден слой разнозернистого песка с мелкой дресвой и небольшим количеством хорошо окатанного (3-4 класс) гравия. В основании слоя залегает заиленный песок с дресвой, он перекрыт разнозернистым алевритистым песком, в кровле – тонкий слой мелкозернистого заиленного песка. В отложениях большом В количестве встречены явно переотложенные Eupyxidicula zabelinae, Stephanopyxis sp., Coscinodiscus marginatus и C. asteromphalus, обнаруженные

в морском плиоцене о. Шикотан [Терехов и др., 2011]. Вид Е. zabelinae зональный, вымерший раннем неоплейстоцене В [Пушкарь, Черепанова, 2001]. Плиоценовые отложения найдены в бухте Хромова и, возможно, есть и в районе Малокурильска, накопление их происходило в условиях открытого мелководного морского бассейна [Терехов и др., 2011]. Вместе с тем в осадках найдены бентосные диатомеи, характерные для мелководных обстановок: Cocconeis scutellum, Craticula halophila, Nitzschia sigma, Achnanthes brevipes, Tryblionella plana, есть фрагменты неритического Chaetoceros sp. и океанических Actinocyclus ochotensis, Coscinodiscus sp, Thalassiosira sp., *Thalassiothrix* распространенных sp., современных условиях. Большая И В часть зерен >1 мм плохо окатаны. Можно предположить, что здесь фиксируются как поступление во время цунами материала со стороны моря, так и переотложение лревних отложений co склона или речной долины. Увеличение мошности отложений также может быть связано с местонахождением точки ближе к борту и поступлением материала со склона. Судя по положению слоя песка в разрезе, отложения могли быть образованы во время палеоцунами Ts 8.

Ниже, на границе торфяника и озерных отложений, выходит слой мелкозернистого песка, включающего наряду с переотложенными створками Eupyxidicula zabelinae, E. (Stephanopyxis) turris, Thalassiosira sp. сублиторальные бентосные Cocconeis scutellum, Craticula halophila, Nitzschia sigma, Navicula peregrina, Prestauroneis integra, Fallacia forcipata. Отложения сопоставляются с палеоцунами Ts 9. Нижележащие отложения накапливались в сильно распресненной лагуне. Из солоноватоводных диатомей встречены бентосные Melosira lineata, Nitzschia sigma, Pseudofallacia tenera и планктонный Thalassiosira bramaputrae.

В вершине бухты был обследован котлован (разрез 15209) в 140 м от уреза (абс. высота 1.8 м). Среди алевритовых илов обнаружены хорошо выраженные слои мелкозернистых песков, выходящие выше и под

вулканическим пеплом Та-с (рис. 4). Состав пресноводных диатомей из вмещающих отложений соответствует условиям проточного озера, находившегося в приустьевой зоне ручья в пределах слабо заболоченной речной долины с признаками почвенных процессов, подверженной частым наводнениям. В комплексе приблизительно в равных долях найдены почвенные виды Hantzschia amphioxys, Luticola mutica, Pinnularia borealis, Humidophila contenta, Pinnularia obscura и виды, характерные для стоячих и текучих вод, такие как Planothidium lanceolatum, Odontidium mesodon, Rhoicosphenia abbreviata, Gomphonema angustum, Meridion circulare, M. constrictum, Fragilaria vaucheriae, Reimeria sinuata, Cocconeis placentula, Navicula lanceolata, Placoneis elginensis. Диатомей, характерных для болотных обстановок, мало, встречаются Eunotia praerupta, E. minor, Pinnularia brebissonii. Морское происхождение песков доказывают находки морского бентосного Cocconeis costata и солоноватоводных Tabularia fasciculata, Prestauroneis integra (верхний слой песка) и морского бентосного Amphora proteus и солоноватоводных планктонного Thalassiosira bramaputrae, бентосного Prestauroneis integra (нижний слой песка). Найдены также переотложенные фрагменты Eupyxidicula zabelinae, Stephanopyxis sp., Coscinodiscus marginatus, Coscinodiscus sp., типичных для морского плиоцена [Терехов и др., 2011]. Зафиксированные в этом разрезе палеоцунами сопоставляются с событиями ~2080 и 2700 кал. л. н. (Ts 4 и Ts 6). Подобные пески широко распространены на тихоокеанской стороне острова [Разжигаева и др., 2008].

Рекогносцировочные работы по поиску отложений цунами были проведены на заболоченных участках в долине ручья Отрада выше поселка (рис. 1). Вскрытая мощность рыхлых отложений до 2.5 м (рис. 4). Здесь в разрезах торфяников и почвах обнаружены прослои мелко- и среднезернистых хорошо сортированных песков. Отложения разрезов 506, 606 очень богаты диатомеями и по видовому составу, и по количественному содержанию. Среди пресноводных ведущими по обилию створок являются виды обрастаний, такие как Planothidium lanceolatum, Fragilaria vaucheriae, Odontidium mesodon, O. hyemale, Karayevia clevei, Achnanthidium minutissimum, Eucocconeis laevis, включая типичные реофилы Meridion circulare, M. constrictum. Rhoicosphinia abbreviata, Hannaea arcus, H. arcus f. recta, Diatoma vulgaris. В отдельных слоях обнаружено заметное количество Staurosira venter, S. subsalina. Здесь также высоко богатство донных видов, среди которых выделяются Navicula cryptocephala, N. slesvicensis, N. lanceolata, Nitzschia linearis. Почвенных диатомей и видов, характерных для болот, мало. Подобный состав диатомовой флоры характерен для проточного озера (старицы). Разрез 606 вскрывает отложения около заболоченного берега палео-озера. Во всех песчаных слоях кроме явно переотложенных фрагментов глубоководных морских видов (Coscinodiscus marginatus, Eupyxidicula zabelinae, Stephanopyxis sp.) встречаются характерные для соленых озер, лагун, лиманов и устьев рек Navicula peregrina, Prestauroneis integra, Craticula halophilla, в отдельных

пробах – Tryblionella apiculata, Thalassiosira bramaputrae. Маловероятно, что эти виды переоткладывались с глубоководными из древних морских отложений. Некоторые из солоноватоводных видов отмечаются и в водоемах, богатых электролитами, и могли попасть в озеро при ином положении береговой линии в средне-позднеголоценовые трансгрессивные фазы. Возможно, признаком морских наводнений могут быть находки в некоторых слоях песка бентосного Tryblionella apiculata. Выделение отложений палеоцунами в этой части побережья требует дальнейших исследований.

Повторяемость сильных цунами. На побережье Малокурильской бухты зафиксированы только наиболее сильные цунами, которые интенсивно проявились со стороны Южно-Курильского пролива. Повторяемость таких событий составляет 1 раз в тысячу лет за последние 2 тыс. кал. лет (рис. 5), что реже, чем на тихоокеанской стороне острова, где сильные цунами проходили каждые 300 лет [Разжигаева и др., 2008].



Рис. 4. Строение разрезов голоценовых отложений береговой низменности в вершине бух. Малокурильская. 1 – цунамигенный песок, 2 – песок, 3 – алевритистый песок, 4 – галька, 5 – дресва, 6 – алеврит, 7 – суглинок, 8 – супесь, 9 – оторфованный песок, 10 – торф, 11 – почва, 12 – вулканический пепел, 13 – находки морских диатомей.

Геосистемы переходных зон, 2019, т. 3, № 2, с. 219–236



Рис. 5. Число цунами и повторяемость событий (разница во времени между последовательными событиями), зафиксированных в отложениях палеоозера на берегу бухты Малокурильская.

Сильные цунами были более частыми в период 2-5.1 тыс. кал. л. н., в этот временной интервал зафиксировано 9 событий, повторяемость их была выше – 1 раз в 180-500 лет, а в отдельных случаях цунами происходили через 90 лет. Особенно сильными были цунами Ts 8 и Ts 9, произошедшие ~3.5 и 3.8-3.9 тыс. кал. л. н., зоны затопления превышали 330 м. Возможно, во время цунами Ts 8 на ближайшем склоне был сейсмогенный оползень, материал которого был переотложен волнами цунами в озеро. Второе вызвало наиболее интенсивную эрозию как дна, так и бортов бухты. В среднем голоцене (5.1-7.5 тыс. кал. л. н.) повторяемость сильных цунами снизилась: 1 событие в 0.8-1 тыс. кал. лет. По результатам численного моделирования с учетом данных о проявлении исторических событий в бухте Малокурильская, цунами с высотой заплеска 4-6 м здесь могут иметь повторяемость 1 раз в 100 лет [Шевченко и др., 2018]. Все палеособытия были более масштабными, чем цунами ХХ в.

Выводы

Исследования отложений палеоцунами на заселенном побережье о. Шикотан дает возможность продлить временные ряды сильных событий до нескольких тысяч лет и получить некоторые характеристики заплесков. Найдены отложения 2 исторических и 13 палеоцунами и выявлена частота сильных цунами для бухты Малокурильская за последние 7.5 тыс. лет. Следует оговорить, что палеособытия, которые были реконструированы по геологическим данным, не имеют современных аналогов. Выявлены особенности осадконакопления при разновозрастных событиях, определены источники материала, перенесенного волнами цунами, наиболее сильные цунами сопровождались активной эрозией дна бухты, бортов бухты и склонов. К сожалению, строение берегов не позволило определить максимально возможные высоты заплесков палеоцунами. Для этого необходим поиск других объектов со стороны Южно-Курильского пролива. В цунамиопасной зоне находятся нижние части пос. Малокурильск, эти участки в последние десятилетия активно осваиваются и вовлекаются в хозяйственную деятельность. Геологические материалы показывают, что палеособытия были более интенсивными, хотя и более редкими, чем известные исторические цунами. Полученные данные следует учитывать при оценке цунамиопасности побережья и разработке мероприятий безопасного природопользования.

Список литературы

1. Аверьянова В.Н., Федотов С.А., Ферчев М.Д. Предварительные данные о землетрясении и цунами 6 ноября 1958 г. // Бюл. совета по сейсмологии. 1961. № 9. С. 89–99.

2. Атлас Курильских островов / В.М. Котляков, Н.Н. Комедчиков, П.Я. Бакланов (ред.). М.; Владивосток: ДИК, 2009. 516 с.

3. Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.

4. Гаврилов В.К., Соловьева Н.А. Вулканогенноосадочные формации геосинклинальных поднятий Малых и Больших Курил. Новосибирск: Наука, 1973. 152 с.

5. Давыдова И.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.

6. Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные / В.С. Шешукова-Порецкая (отв. ред.) Л.: Наука, 1974. Т. 1. 400 с.

7. Диатомовый анализ. Кн. 3. Л.: Госгеолитиздат, 1950. 398 с.

8. Иващенко А.И., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А., Йех Г., Жукова Л.Д., Золотухина Н.Д., Кайстренко В.М., Като Л.Н., Клочков А.А, Королев Ю.П., Кругляков А.А., Куликов Е.А., Куракин В.Н., Левин Б.В., Пелиновский Е.Н., Поплавский А.А., Титов В.В., Харламов А.А. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. // Докл. АН. 1996. Т. 348, № 4. С. 532–538.

9. Кайстренко В.М., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А. и др. Проявление цунами 4 октября 1994 года на Шикотане // Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 8. С. 55–73.

10. Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Проявление цунами Тохоку 11 марта 2011 года на российском тихоокеанском побережье // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38, № 1. С. 41–64.

11. Ковтунович П.Ю. Геологическое строение // Курильские острова (природа, геология, землетрясения, вулканы, история, экономика). Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, 2004. С. 57–97.

12. Левин Б.В., Иващенко А.И., Куликов Е.А. Заключение подкомиссии по цунами и морским наводнениям о результатах обследования последствий землетрясения и цунами 4(5).10.1994 г. в береговой зоне Южных Курильских островов // Шикотанское землетрясение 4(5).10.94: экстренный выпуск. ФССН: Информ.-аналит. бюл. М., 1994. С. 5–7.

13. Логвиненко Н.В., Сергеева Э.И. Методы изучения осадочных пород. М.: Недра, 1986. 240 с.

14. Лоция Охотского моря. Вып. 1. Южная часть моря / Мин-во обороны СССР. Гидрогр. упр. 1968. 284 с.

15. Пинегина Т.К. Пространственно-временное распределение очагов цунамигенных землетрясений тихоокеанского и беринговоморского побережий Камчатки по отложениям палеоцунами: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. М., 2014. 43 с.

16. Пушкарь В.С., Черепанова М.В. Диатомеи плиоцена и антропогена Северной Пацифики (Стратиграфия и палеэкология). Владивосток: Дальнаука, 2001. 229 с.

17. 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. [Razzhigaeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Ilyev 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].

18. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Арсланов Х.А., Кайстренко В.М., Горбунов А.О., Петров А.Ю. Проблема палеореконструкций мегацунами на Южных Курилах // *Тихоокеанская геология.* 2017. Т. 36, № 1. С. 37–49. [Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Arslanov K.A., Petrov A.Y., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O. The problem of past megatsunami reconstructions on the southern Kurils. *Russian J. of Pacific Geology*, 2017, 11(1): 34-45. https://doi.org/10.1134/s1819714017010079]

19. Рябушко Л.И. Диатомовые водоросли (Bacillariophyta) залива Восток Японского моря // Биота и среда заповедников Дальнего Востока. 2014. № 2. С. 4–17.

20. Соловьев С.Л. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1737–1976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 61–128.

21. Справочник по литологии / Н.Б. Вассоевич, В.Л. Либрович, Н.В. Логвиненко, В.И. Марченко (ред). М.: Недра, 1983. 509 с.

22. Терехов Е.П., Цой И.Б., Можеровский А.В., Вагина Н.К. Плиоценовые отложения острова Шикотан (Малая Курильская гряда) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2011. Т. 19, № 3. С. 96–110. [Terekhov E.P., Tsoy I.B., Mozherovskii A.V., Vagina N.K. Pliocene sediments of Shikotan Island (Lesser Kuril Ridge). Stratigraphy and Geological Correlation, 2011, 19(3): 337-351. https://doi.org/10.1134/s0869593811030105]

23. Шевченко Г.В., Лоскутов А.В., Кайстренко В.М. Новая карта цунамирайонирования Южных Курильских островов // *Геосистемы пере*ходных зон. 2018. Т. 2, № 3. С. 225–238. https://doi. org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.225-238

24. Шикотанское землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года. Хроника событий, анализ последствий и современное состояние проблемы / Левин Б.В., Лихачева О.Н., Ломтев В.Л., Тихонов И.Н., Шевченко Г.В. (ред.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2015. 128 с.

25. Bronk Ramsey C. Methods for summarizing radiocarbon datasets // *Radiocarbon*. 2017. Vol. 59, N 2. P. 1809–1833. doi:10.1017/RDC.2017.108

26. Dawson A.G., Stewart I. Tsunami deposits in the geological record // *Sedimentary Geology*. 2007. Vol. 200(3–4). P. 166–183. https://doi.org/10.1016/j. sedgeo.2007.01.002

27. Goto T., Satake K., Sugai T., Ishibe T., Harada T., Gusman A.R. Tsunami history over the past 2000 years on the Sanriku coast, Japan, determined using gravel deposits to estimate tsunami inundation behavior // *Sedimentary Geology*. 2019. Vol. 382. P. 85–102. doi:10.1016/j. sedgeo.2019.01.001

28. Kaistrenko V., Razjigaeva N., Kharlamov A., Shishkin A. Manifestation of the 2011 Great Tohoku tsunami on the Kuril Island coast: Tsunami with ice // *Pure and Applied Geophysics*. 2013. Vol. 170. P. 1103–1114. doi:10.1007/s00024-012-0546-9

29. Krammer K., Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae. Teil 1. Naviculaceae.* Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1986. 876 p.

30. Krammer K., Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae*. *Teil 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.

31. Nazarova L., Grebennikova T.A., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Belyanina N.I., Arslanov Kh.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Kharlamov A.A., Rudaya N., Palagushkina O., Biskaborn B.K., Diekmann B.R. Reconstruction of Holocene environmental changes in Southern Kurils (North-Western Pacific) based on palaeolake sediment proxies from Shikotan Island // *Global and Plan. Change.* 2017. Vol. 159. P. 25–36. doi:10.1016/j.gloplacha.2017.10.005

32. Nishimura Yu., Nakamura Y., Kaistrenko V., Iliev A.Ya. Tsunami deposits and tephra on Kunashir and Shikotan Islands, Southern Kuril Islands // *Chikyu Monthly.* 2009. Vol. 31, N 6. P. 311–320.

33. 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, N 12. P. 3307–3328. doi:10.1007/s00024-014-0794-y

34. Razzhigaeva N.G., Matsumoto A., Nakagawa M. Age, source, and distribution of Holocene tephra in the Southern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activities in the southern Kurile arc // *Quaternary International.* 2016. Vol. 397. P. 63–78. doi:10.1016/j. quaint.2015.07.070

35. Sakaguchi Y. Warm and cold stages in the past 7600 years in Japan and their global correlation // Bull. of the Dep. of Geogr. Univ. of Tokyo. 1983. Vol. 15. P. 1–31.

36. Sawai Y. Evidence for 17th-century tsunamis generated on the Kurile-Kamchatka subduction zone, Lake Tokotan, Hokkaido, Japan // *J. of Asian Earth Sciences*. 2002. Vol. 20. P. 903–911. https://doi.org/10.1016/s1367-9120(01)00077-3

37. Sugawara D., Minoura K., Imumura F. Tsunami and tsunami sedimentology // *Tsunamites – Features and Implications*. Amsterdam: Elsevier, 2008. P. 9–49. https:// doi.org/10.1016/b978-0-444-51552-0.00003-5

Сведения об авторах

РАЗЖИГАЕВА Надежда Глебовна (ORCID 0000-0001-7936-1797), доктор географических наук, главный научный сотрудник, ГАНЗЕЙ Лариса Анатольевна (ORCID 0000-0002-2538-6603), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, ГРЕБЕННИКОВА Татьяна Афанасьевна (ORCID 0000-0002-5805-391Х), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник – лаборатория палеогеографии и геоморфологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток; 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; ХАРЛАМОВ Андрей Александрович (ORCID 0000-0003-2623-5388), ведущий инженер лаборатории цунами – Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва; АРСЛАНОВ Хикматулла Адиевич (ORCID 0000-0002-2302-8175), доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, МАКСИМОВ Федор Евгеньевич (ORCID 0000-0002-9429-3216), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник – научная лаборатория геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург.