

УДК 551.21

ОСАДКИ ТОХОКУ ЦУНАМИ 11 МАРТА 2011 г. НА ЮЖНЫХ КУРИЛАХ: СОСТАВ И БИОФОССИЛИИ

© 2014 г. Н. Г. Разжигаева¹, Л. А. Ганзей¹, Т. А. Гребенникова¹, Е. Д. Иванова¹,
М. С. Лящевская¹, А. А. Харламов², В. М. Кайстренко³

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
e-mail: nadyar@tig.dvo.ru

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
e-mail: har151@mail.ru

³Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
e-mail: victor@imgg.ru

Поступила в редакцию 20.12.2012 г., после доработки 05.11.2013 г.

Изучение осадков Тохоку цунами проводилось на о-вах Кунашир, Шикотан, Зеленый, Юрий, Танфильева. Получены данные по осадкам, отобраным как сразу после события со льда, так и через полгода и через полтора года, одновременно с замерами высоты заплеска и описанием зон затопления. Покровы песков и илов обнаружены только в закрытых бухтах, имевших ледяной покров. Волны цунами взломали лед, что вызвало даже при небольших величинах заплеска эрозию дна на мелководье и разрушение торфяников на низменных участках побережья. Изучен гранулометрический состав осадков, бентосные фораминиферы, диатомеи, спорово-пыльцевые комплексы. Ассоциации фораминифер в отложениях цунами отражают особенности бентосной микрофауны, обитающей в прибрежной зоне. Среди морских диатомей преобладают сублиторальные бентосные формы, встречаются сублиторальные планктонные, неритические и океанические виды. Палиноспектры включают пыльцу и споры локальной островной растительности, аллохтонную пыльцу, перенесенную волной цунами и ветром с сопредельных территорий и переотложенные таксоны из верхне-лоценовых отложений, эродированных цунами. Проведено повторное обследование на предмет сохранности осадков цунами.

DOI: 10.7868/S0030157414020208

ВВЕДЕНИЕ

Изучение особенностей осадконакопления во время прохождения современных крупных цунами имеет большое значение для разработки критериев выделения цунамигенных фаций в геологических разрезах при оценке возможного масштаба и частоты проявления этих событий в прошлом. Последним крупным цунами в Тихом океане было Тохоку цунами 11 марта 2011 г., произошедшее в результате сильного землетрясения (М 9.0), эпицентр которого располагался у восточного побережья о. Хонсю. Цунами имело трансокеанический характер, основная энергия волн была направлена в сторону северо-востока о. Хонсю и Тихого океана [26]. Курильские острова оказались в краевой части распространения цунами. Замеры заплеска, сделанные очевидцами на Южных Курилах сразу после прохождения цунами, показали величины от 0.5 до 3 м, максимум был отмечен в б. Крабовой, о. Шикотан [5]. Обследование проявления Тохоку цунами на Южных Курилах, проведенное через полгода после землетрясения, показало, что на побережье изученных островов заплеск был не более 3–4 м,

максимальные заплески (около 5 м) были замерены на северо-востоке о. Зеленый и о. Шикотан в районе м. Край Света [23]. Хотя волны, достигшие Южных Курил, были небольшие, изучение седиментологического эффекта такого события представляет большой интерес для палеореконструкций и межрегиональных корреляций мегацунами.

Целью работы является анализ факторов, контролирующих особенности осадконакопления при прохождении цунами на участках побережья, имеющих разное строение и ориентацию по отношению к фронту цунами при разных величинах заплеска, а также анализ сохранности осадков. Проявление Тохоку цунами изучалось в тех же бухтах, где проводились работы по изучению осадков Шикотанского цунами 1994 г. [9], палеоцунами [10, 12] и осадков экстремальных штормов 2006–2007 гг. [2]. Изучение осадков Тохоку цунами начато в Японии [13, 15, 18, 19, 25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В августе–сентябре 2011 г. было проведено обследование последствий цунами на побережье

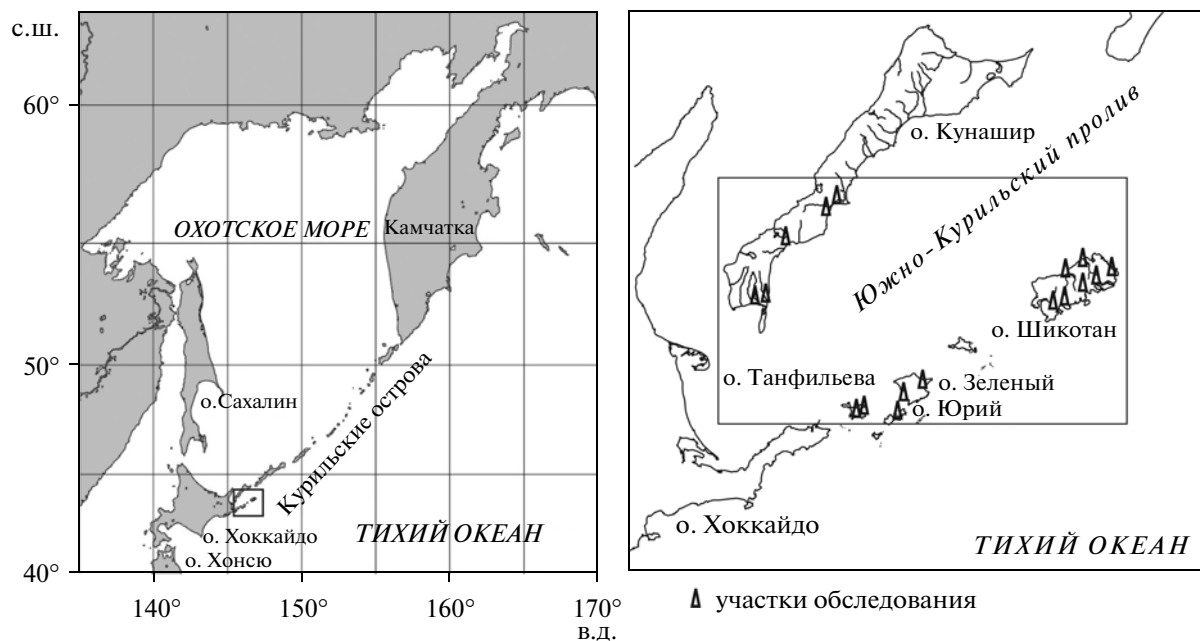


Рис. 1. Район работ.

о-вов Кунашир, Шикотан, Зеленый, Юрий, Танфильева (рис. 1). Были описаны следы цунами, линия, маркирующая максимальный заплеск, следы эрозии и распределение осадков, измерялись высота и дальность заплесков с помощью нивелирования. Изучение воздействия цунами на береговую зону и отбор осадков проводились по трансектам от линии уреза океана вглубь суши. Изучались также осадки, отобранные сразу после цунами со льда. В августе–сентябре 2012 г. было проведено повторное обследование, что позволило оценить сохранность материала и найти новые следы этого цунами в бухтах, которые ранее не обследовались.

Гранулометрический анализ песков выполнен на ситах с шагом γ , алевропелитовые илы изучались на седиментографе “Analysette 22”. Микропалеонтологические исследования включали фораминиферовый, диатомовый и спорово-пыльцевой анализы. Фораминиферы изучались в осадках, отобранных сразу после цунами с поверхности взломанных и перенесенных волной льдин, диатомеи – в осадках со льдин и в осадках, отобранных через полгода после цунами. Споры и пыльца – из осадков, отобранных через полгода после цунами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обследование проявления Тохоку цунами на Южных Курилах, проведенное через полгода после землетрясения, показало, что на большинстве берегов следы заплеска и максимального проникновения волн хорошо идентифицируются. Осо-

бенно хорошо следы и осадки цунами выражены на побережье о. Шикотан. Линия заплеска цунами обычно маркируется полосой морского мусора, деревяшек, травы, морских водорослей и зоостерой (рис. 2з, 2и). Иногда встречаются крупные бревна, бочки, раковины моллюсков, остатки панцирей крабов, губки. Направление волны во время цунами показывают хорошо сохранившиеся прошлогодние жесткие листья колосняка: как правило, трава лежит по ходу прямого потока и направлена в сторону суши; в местах, где происходил сток воды обратным потоком, трава развернута в сторону моря.

На большинстве участков побережья волны цунами перекрывали штормовой вал и заходили вглубь суши на незначительное расстояние [23]. Максимальная дальность проникновения волн цунами зафиксирована в устьях рек. На Шикотане с тихоокеанской стороны в устьях рек волны цунами распространились до 200 м (б. Песчаная), со стороны Южно-Курильского пролива более, чем на 230 м (б. Крабовая и Отрадная). На о. Кунашир в р. Серебрянка волны цунами заходили до 630 м. На малых островах на юге Малой Курильской гряды дальность проникновения цунами была менее 70 м, в устьях рек достигала 100 м.

Цунами практически не сопровождалось эрозией и на побережье открытых бухт, как правило, не оставило осадков. Иная ситуация наблюдается в закрытых бухтах, где обнаружены протяженные покровы осадков.

Остров Кунашир. На о. Кунашир цунами почти не оставило осадков, маломощный слой песка, который был на льдинах, вынесенных на берег

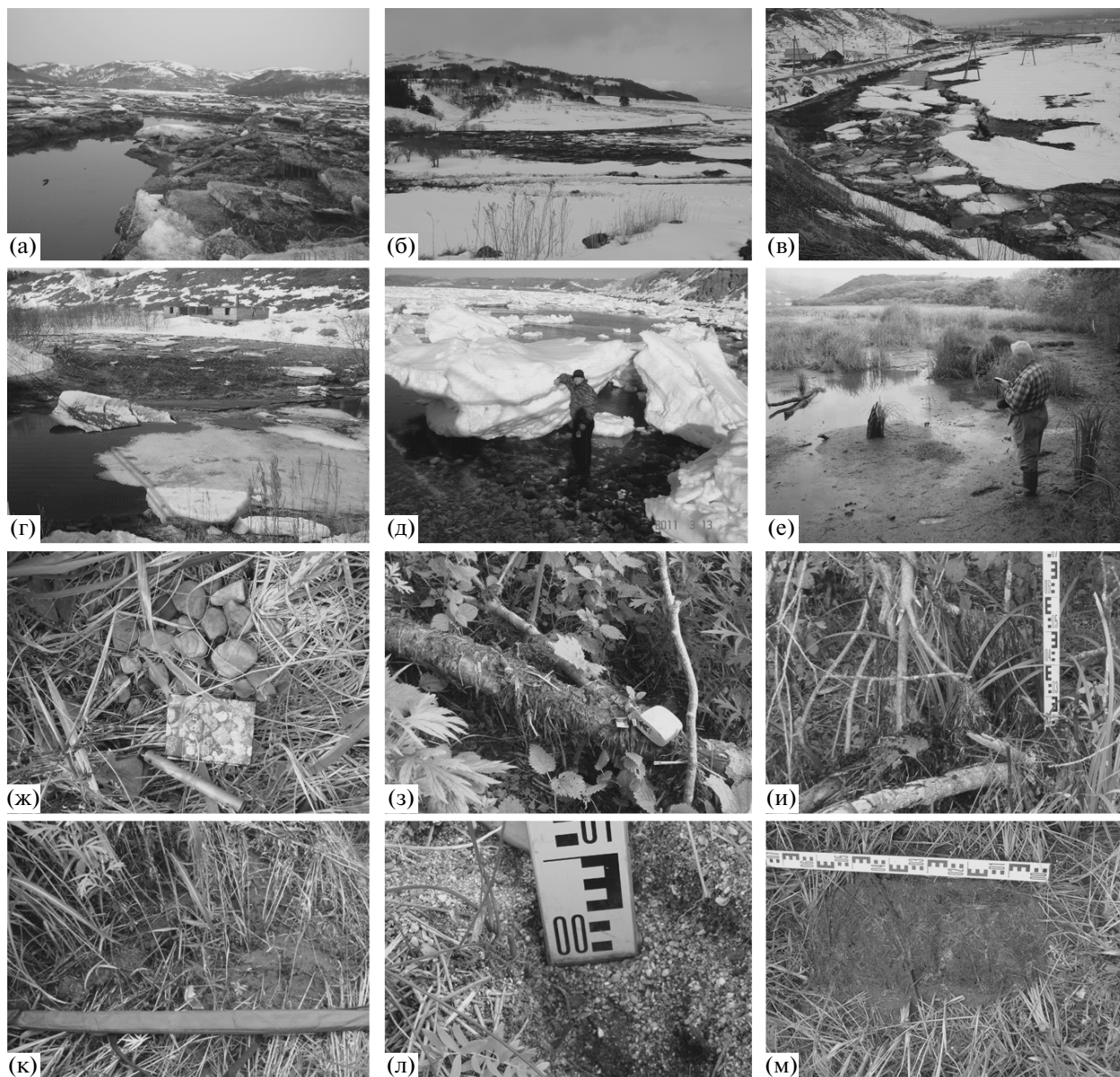


Рис. 2. Следы Тохоку цунами на Южных Курилах.

(а, б, в) — льдины, взломанные волной цунами, покрытые осадками, б. Крабовая (фото С.Е. Карпенко), б. Отрадная (фото И. Томасона), о. Шикотан; устье р. Серебрянка, о. Кунашир (фото И.А. Неведомской), (г) — зона максимального заплеска цунами на тихоокеанской стороне Серноводского перешейка, о. Кунашир (фото В.Н. Зуева); (д) — льдины, вынесенные цунами в б. Зоркая, о. Танфильева (фото С.Н. Квиташа); (е) — зона эрозии, б. Крабовая, о. Шикотан; (ж) — галька, оставленная цунами, б. Безымянная, о. Шикотан; (з, и) — пучки zostеры с илом, б. Крабовая и Отрадная, о. Шикотан; (к) — покров цунамигенных алевропелитовых осадков, б. Малая Церковная, о. Шикотан; (л) — гравий и галька, оставленные цунами, б. Рудня, о. Зеленый; (м) — цунамигенный песок, б. Зоркая, о. Танфильева.

(рис. 2в, 2г), обнаружить через полгода не удалось. Осадки, отобранные со льдин в приустьевой части р. Серебрянка (б. Южно-Курильская), представлены черным и серым сильно заиленным мелкозернистым песком с многочисленными остатками zostеры и водорослей. Гранулометрические кривые распределения одномодальные, модами являются фракции 0.1–0.125 мм, 0.125–0.16 мм. Материал хорошо сортирован. Кривые распределения

очень похожи на пески пляжа и осушки, которые являлись основными источниками материала (рис. 3).

Осадки характеризуются высоким содержанием бентосных фораминифер, встречено 28 видов. Фораминиферы представлены, в основном, известковыми формами, отмечается хорошая сохранность раковин. Наиболее многочисленны представители родов *Criboelphidium* и *Buccella*.

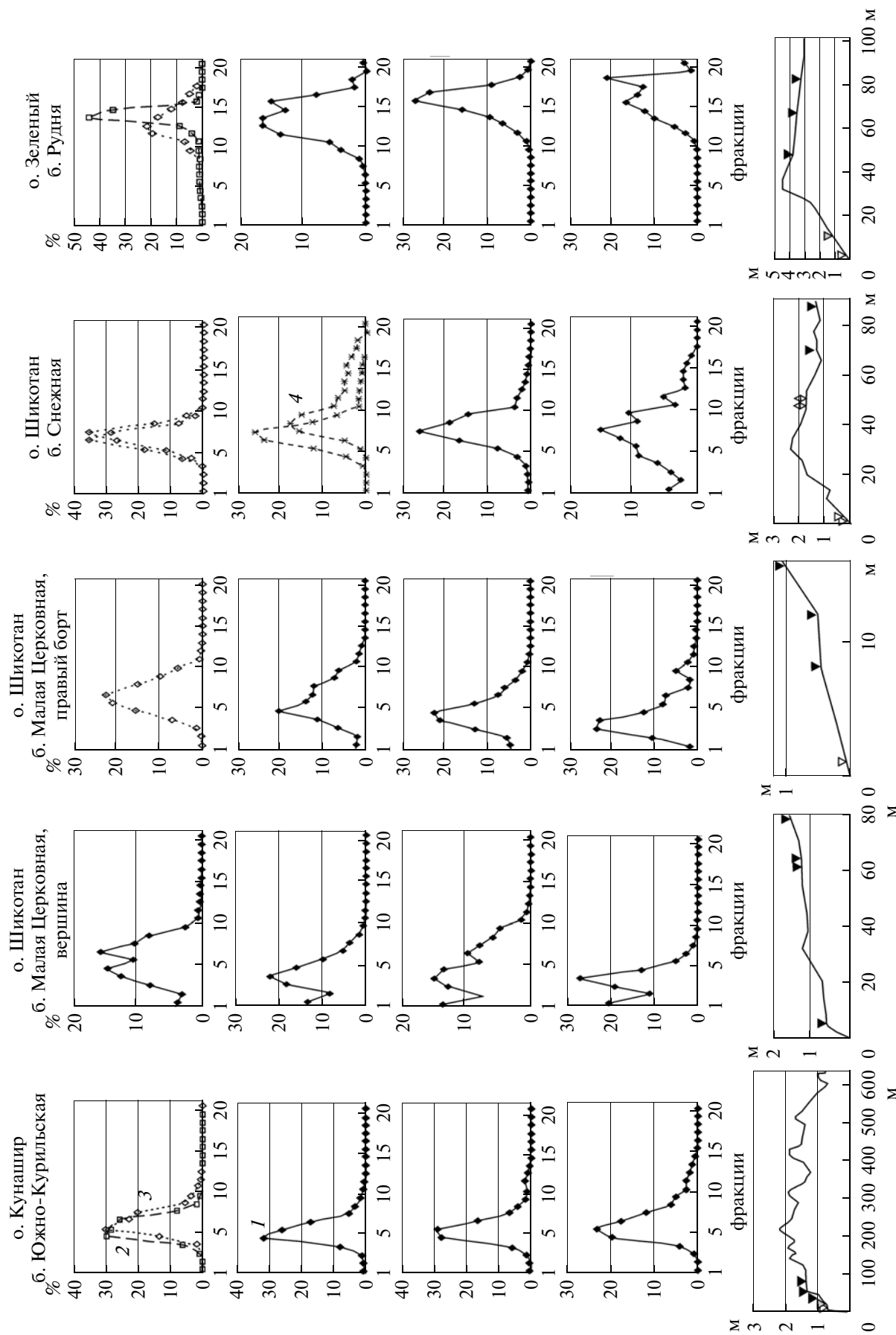


Рис. 3. Гранулометрические кривые распределения цунамигенных песков и других прибрежно-морских фаций, нижний ряд – гипсометрический профиль от уреза вглубь суши с точками отбора проб (затлечные треугольники – осадки цунами).

Осадки: 1 – Тохоку цунами, 2 – пляж, 3 – осушка, 4 – шторма 2006–2007 гг.

Фракции, мм: 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; 21 > 5.

Доминантами и субдоминантами являются *Cribrorhynchium subarcticum*, *Cr. etigoense*, *Cr. excavatum*, *Cr. asterineum*, *Buccella granulata*, *B. inusitata*, *B. hannai arctica*, *B. hannai oris*. Все эти виды встречаются на литорали тихоокеанской стороны о. Кунашир [1], перенос материала шел как с широких песчаных пляжей, так и с бенча Южно-Курильской бухты.

В ходе повторного обследования на побережье зал. Измена около устья руч. Хлебникова обнаружен небольшой по площади покров белого крупнозернистого хорошо сортированного песка (мощность до 20 см), залегающий на сухой траве за пределами штормового вала. Возможно, осадки имеют цунамигенное происхождение. Пески по структурным характеристикам близки к осадкам пляжа, мода 0.5–0.63 мм. Высота заплеска была около 0.6 м, дальность – 36 м.

Остров Шикотан. С тихоокеанской стороны острова в большинстве бухт в зоне заплеска цунами встречена лишь единичная галька, валуны или небольшие пятна песка с гравием, лежащие на прошлогодней траве (рис. 2ж). В б. Безымьянная галька залегают небольшими грядами, ориентированными по направлению прямого потока перпендикулярно береговой линии. Покров осадков обнаружен в б. Малая Церковная (рис. 2к), отделенной от океана о. Айвазовского и в южной части которой расположена небольшая бухта, образованная после косейсмического опускания острова в 1994 г. и представляющая собой затопленную приустьевую зону реки. На берегу цунами образовало покров алевритистых песков и песчаных алевритов шириной до 78 м, мощностью до 9 см. По замерам 2012 г. мощность осадков достигает 14 см в понижениях рельефа. Вглубь суши мощность осадков уменьшается до 1 см, покров становится не сплошным, осадок залегают пятнами. Содержание алевритовых фракций возрастает от 26.9 до 77.8%, сортировка частиц улучшается при продвижении вглубь суши. Кривые распределения би- и полимодальные. Главная мода лежит в области 0.08–0.1 мм, в песках около уреза появляются моды 0.1–0.125, 0.16–0.2 мм (рис. 3).

В некоторых точках структура песчаного покрова в разрезе неоднородная, выделяются маломощные более грубые прослои (до 1 см), перекрытые более тонким материалом, что фиксирует прохождение двух-трех волн и неоднократное стояние воды, во время которого в первую очередь выпадал более крупный материал. В стратифицированных разрезах в более грубых прослоях преобладают песчаные фракции, содержание мелкого песка составляет 54%, среднего 23.3%, крупного 2.4%. Кривые распределения бимодальные с хорошо выраженными модами 0.1–0.125, 0.2–0.25 мм. В более тонких осадках содержание алеврита достигает 47.9%, хорошо выражена мода

0.08–0.1 мм. Мода 0.16–0.2 мм характерна для осадков осушки, которые характеризуются одномодальной кривой распределения, доля мелкого песка составляет 74.3%. Основным источником алевритовых фракций, по-видимому, был подводный склон. После прохождения цунами содержание ила увеличилось и на осушке.

В осадках цунами обнаружено 60 видов морских диатомей (до 56.3%). Наиболее разнообразны виды родов *Cocconeis* (10 форм), *Diploneis* (4), *Hyalodiscus* (4), *Grammatophora* (3). Доминируют сублиторальные бентосные *Cocconeis scutellum* (до 10.6%), *C. pellucida* (до 6%), *Rhabdonema arcuatum* (до 9%), *Fragilaria fasciculata* (до 8%), *Synedra kamtschatica* (до 5%), *Melosira nummuloides* (до 7.1%), *M. moniliformis* (4.5%), *Planolithidium haukianum* (4.2%). Планктонные виды (9.3%) представлены сублиторальными холодноводными *Odontella aurita* (2.1%), *Hyalodiscus scoticus* (1.5%), *Actinocyclus senarius* (2.4%), присутствуют *Paralia sulcata*, *Navicula directa*, характерные для бухт и заливов. Отмечены разнообразные океанические и неритические северо- и арктобореальные *Thalassiosira eccentrica*, *T. gravida*, *T. pacifica*, *T. decipiens*, в том числе южно-бореальные *Thalassionema nitzschoides*, *Coscinodiscus asteromphalus*, *C. radiatus*, *C. perforatus*, бореально-нотальный *Coscinodiscus centralis*, бореально-тропический *C. concinnus*.

Вблизи устья ручья встречено 46 видов морских и солоноватоводных диатомей (до 62%): бентосные *Opephora marina* (5.4%), *Planolithidium haukianum* (4.7%), *Cocconeis pellucida* (3%), *Planolithidium delicatulum* (2.1%), *Fragilaria fasciculata* (3%), *Melosira nummuloides* (3%), *M. lineata*, *Grammatophora hamulifera*. Из планктонных обнаружены сублиторальные *Achnanthes brevipes* var. *intermedia*, *Odontella aurita*, *Hyalodiscus scoticus*, *Navicula directa*, фрагменты *Triceratium arctica*, а также неритических и океанических *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Thalassiosira eccentrica*, *T. kryophila*, *T. gravida*, *Thalassiothrix longissima*, *Thalassionema nitzschoides*, *Actinocyclus curvatulus*. В стратифицированных покровах в более грубых прослоях меньше морских видов, преобладают бентосные формы. Доминируют виды с мелкими створками *Planolithidium haukianum* (19.4%), *Planolithidium delicatulum* (3.6%), *Opephora marina* (5.6%), *Amphora marina* (3.2%). Из планктонных встречены сублиторальный *Navicula directa* и фрагменты пелагических *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Thalassiosira decipiens*. В тонких прослоях доминируют *Cocconeis scutellum* (27.3%), *Planolithidium haukianum* (4.7%), *Melosira nummuloides* (3.7%), *Opephora marina* (3%), из планктонных встречены сублиторальные *Hyalodiscus obsoletus*, *H. scoticus*, *Lyrella forcipata*, *Odontella aurita*, *Actinocyclus octonarius*, из океанических и неритических – *Rhizosolenia hebetata*, *Thalassiothrix longissima*, *Thalassionema nitzschoides*.

Среди пресноводных видов доминируют характерные для мелководных водоемов: мезогалоб *Navicula halophila* (до 20%), *Navicula tenelloides* (49.4%), *Hippodonta hungarica*, *Staurosira venter*, *Pseudostaurosira brevistriata* или для проточных вод: *Diatoma mesodon* (31.3%), *Planothidium lanceolatum* (14.4%), *Rhoicosphenia abbreviata* (12.8%), *Fragilaria arcus* var. *recta* (4.5%). Состав диатомей свидетельствует об эрозии речных отложений, главным образом, в затопленной морем приустьевой части речной долины.

В б. Церковная, где цунами практически не оставило осадков, в морском мусоре, лежащем полосой на линии максимального заплеска, обнаружено 9 видов морских диатомей (67%). Доминирует *Cocconeis scutellum* (55.7%), из планктонных отмечены *Achnanthes brevipes* var. *intermedia*, *A. groenlandica*, *Navicula directa*. Среди пресноводных диатомей высокого обилия достигает вид *Navicula tenelloides*, обитающий в мелководных водоемах, на увлажненных поверхностях и моховом субстрате.

Пятна песков, покрытые илистыми корками, обнаружены на побережье полузакрытой б. Снежкова, что свидетельствует о достаточно долгом стоянии воды, при котором могли выпадать тонкие фракции. Тонкие илистые корки (до 5 мм) с остатками водорослей обнаружены за штормовым валом около реки, где они покрывают грубые осадки штормов 2006–2007 гг. Кривые распределения цунамигенных песков одномодальные (мода 0.2–0.25 мм). Такая же мода характерна для песков осушки, которые лучше сортированы, чем осадки цунами (рис. 3). На участках, где цунами проходило через поле грубых штормовых осадков, возрастает доля крупного песка (до 9.5%) и гравия (до 3%), осадок менее сортирован, кривая распределения становится полимодальной, появляются моды 0.315–0.4, 0.5–0.63 мм. В илистых корках преобладает алеврит (51.4–64.0%), средний размер частиц 15–16 мкм, хорошо выражена мода 20–30 мкм, высока доля пелита (до 30.7%), кривая распределения одномодальная, слабо асимметричная за счет примеси крупного алеврита и мелкого песка (рис. 4). Вероятно, источником алевропелитового материала были осадки старицы, которые размывались и переоткладывались цунами.

В песке встречено 5 морских видов: сублиторальные бентосные *Melosira moniliformis*, *Grammatophora hamulifera*, *Archnoidiscus ehrenbergii*, *Achnanthes brevipes* var. *intermedia* и фрагменты океанического *Coscinodiscus oculus-iridis*. В илистой корке морских диатомей не обнаружено, доминируют виды, характерные для проточных вод: *Diatoma mesodon* (24.4%), *Fragilaria arcus* var. *recta* (12%), *Rhoicosphenia abbreviata* (9.1%), *Planothidium lanceolatum* (6.2%), *Encyonema silesiacum* (6.2%).

В закрытых бухтах со стороны Южно-Курильского пролива, имевших на момент прохождения цунами ледяной покров, волны взломали лед, что вызвало даже при небольших величинах заплеска эрозию дна на мелководье и разрушение торфяников на низменных участках побережья. Особенно активная эрозия наблюдалась в вершине б. Крабовая, где волна, насыщенная крупными льдинами (рис. 2а), не потеряв своей энергии, столкнулась с препятствием и произвела размыв верхнего слоя почвы и торфа (мощностью до 0.6 м), обнажив поверхность подстилающих морских илов (рис. 2е). Протяженность зоны эрозии более 100 м. Около этой зоны на нижних ветвях деревьев и почве встречены пятна алеврита (мощностью до 5 см), покрытые зостерой, обычно растущей на глубинах 1–4 м (рис. 2з). Тонкий слой алеврита (до 2 см) с пучками зостеры встречен на конструкциях моста через р. Анама, куда цунами занесло льдины. На поверхности болота, расположенного в вершине бухты, встречены куски торфа (до 1.3 м), лежащие на прошлогодней траве. На поверхности торфяника обнаружен покров осадков протяженностью до 60 м, сложенный коричневыми алевропелитовыми илами с большим содержанием органики (мощность до 5 см). Осадки цунами влажные, перевевания и размыва не происходит. Через 1.5 года после события мощность осадков практически не изменилась, покровы активно зарастают травой. Исключение составляют техногенные выступающие конструкции, с которых осадки цунами полностью смыты.

В осадках цунами доля алеврита составляет 50.1–59.1%, высоко содержание пелитовых фракций – до 41.5%. Гранулометрические кривые распределения одно- и бимодальные, средний размер зерен 10–21 мкм, хорошо выражена мода 20–30 мкм. Бимодальные осадки характерны для правого борта бухты, где болото менее протяженное и при размыве берега поставлялось больше песчаных фракций. Встречаются как симметричные, так и асимметричные кривые, говорящие о смеси материала из разных источников (рис. 4). Ближе к выходным мысам цунамигенные осадки представлены хорошо сортированными мелкозернистыми песками (85.6%) с примесью алеврита (9.1%) и пелита (5.3%). Осадки, отобранные со льдин сразу после цунами в б. Крабовая в районе порта, представлены разнозернистым песком с галькой и гравием и остатками водорослей.

В цунамигенных илах встречено до 56 видов морских диатомей (до 73.8%). Характерным является разнообразие видов родов *Nitzschia* (11 форм), *Cocconeis* (8), *Diploneis* (8), *Hyalodiscus* (4). Только для этой бухты отмечено высокое содержание сублиторальных планктонных видов (до 32.4%). Доминируют сублиторальные *Cocconeis scutellum* (11.4%), *Planothidium haukianum* (18%), *Opephora marina* (5.6%), *Rhabdonema arcuatum* (5.3%), *Gom-*

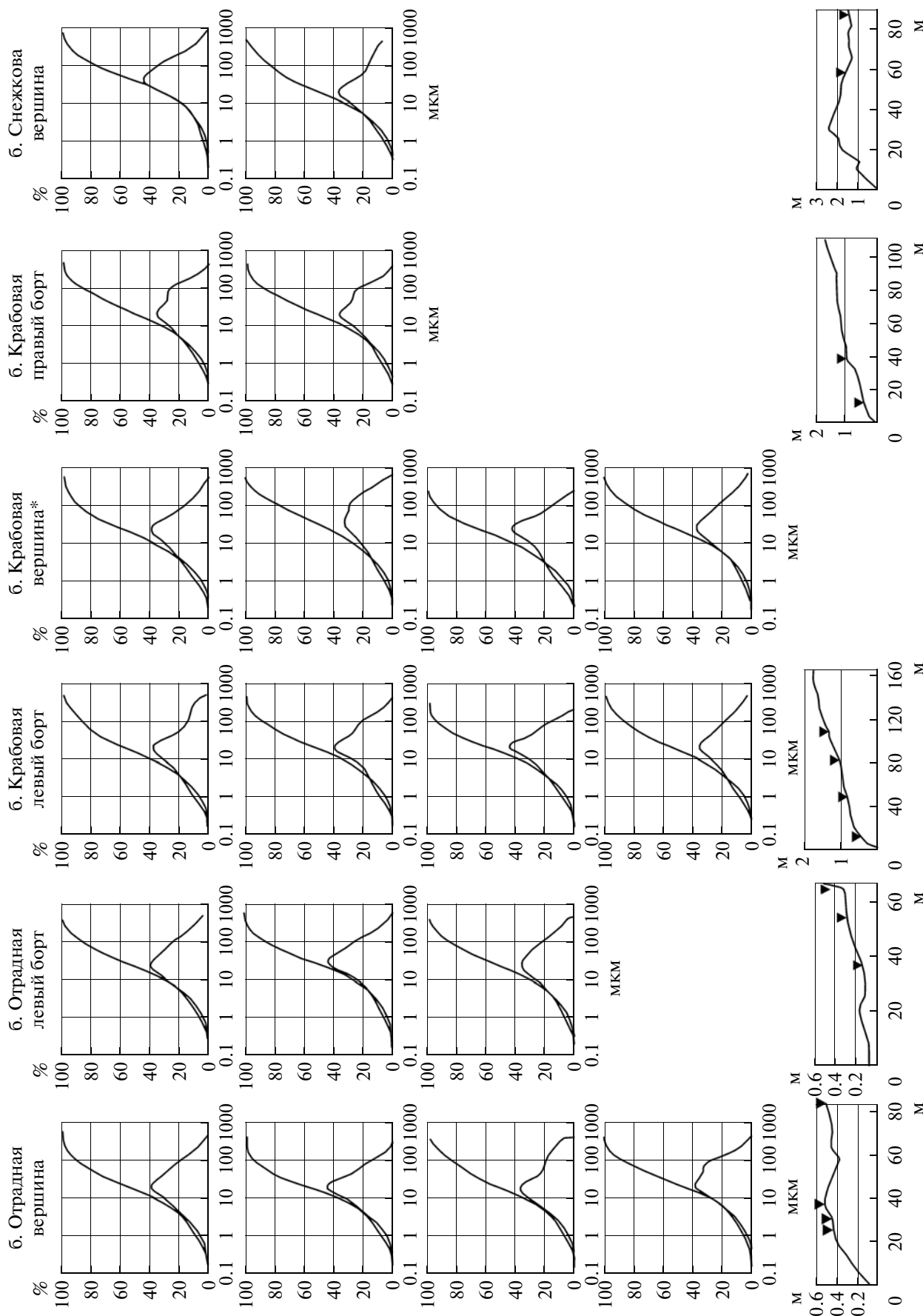


Рис. 4. Гранулометрические кривые распределения и кумулятивные кривые цунамических илов на побережье закрытых бухт о. Шикотан, нижний ряд – гипсометрический профиль от уреза вглубь суши с точками отбора проб.

* Осадки на деревьях и техногенных конструкциях.

phonema exiguum (2.3%), *Amphora marina* (1.6%), планктонный *Odontella aurita* (26%), *Navicula directa* (3.6%), отмечены *Nitzschia littoralis*, *N. levidensis*, *N. levidensis* var. *salinarum* и другие, характерные для полузакрытых бухт. В числе океанических и неритических найдены северо- и арктобореальные *Thalassiothrix longissima*, *Thalassiosira eccentrica*, *T. gravida*, *T. nordenskioldii*, *T. kryophilata*, *T. punctigera*, *T. anguste-lineata*, *Rhizosolenia hebetata*, *Coscinodiscus marginatus*, *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Bacterosira fragilis*, тепловодные представлены *Thalassionema nitzschioides*, *Coscinodiscus asteromphalus*, *C. perforatus*. В пресноводном комплексе преобладают виды, характерные для водоемов разного типа: *Planothidium lanceolatum*, *Fragilaria subsalina*, *Staurosira venter*, *Amphora lybica*, *Cocconeis placentula*. В одном образце преобладают виды, характерные для мелководных озер с повышенной степенью минерализации: *Frustulia creuzburgensis*, *Navicula libonensis*, *N. radiosa*, *Nitzschia liebetruthii* и др.

В осадках цунами, взятых со льдин, отмечено высокое содержание сублиторальных *Cocconeis scutellum*, *Rhabdonema arcuatum*, *Arachnoidiscus ehrenbergii*, *Odontella aurita*, *Fragilaria fasciculata*, *Triceratium arctica*, следует отметить и присутствие океанических видов *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Thalassiosira eccentrica*, *Thalassiothrix longissima*, занесенных волной цунами из открытой части океана.

На побережье б. Отрадная, где волна цунами заходила языками в приустьевые зоны ручьев и на низменный берег в вершине бухты (рис. 2б), найден покров и пятна органогенных алевропелитов (мощностью до 5 см) с пучками зостеры (рис. 2и). Пучки зостеры здесь висели на деревьях и кустах через полгода после события. В цунамигенном иле преобладают алевроитовые фракции (51.8–61.6%), средний размер зерен 12–23 мкм, высоко содержание пелита (до 35.9%). На левом борту бухты осадки имеют одномодальные кривые распределения (мода 20–30 мкм), в вершине бухты – бимодальные, появляется мода 80–100 мкм, свидетельствующая о поступлении материала из двух источников (рис. 4).

В цунамигенных илах встречено до 41 вида морских диатомей (до 88.3%). Характерным является разнообразие видов родов *Nitzschia* (11 форм), *Cocconeis* (8 форм), *Diploneis* (6). Доминируют сублиторальные бентосные *Cocconeis scutellum* (до 45.6%, из них 32.5% с крупными створками >30 мк), *C. costata* (3.9%), *C. californica*, *C. pellucida*, *Fragilaria fasciculata* (до 12.3%), *F. pulchella* (3.4%), *Gomphonema exiguum* (до 8.1%), *Melosira lineata* (10.4%), *Planothidium haukianum* (4.1%), планктонные *Odontella aurita* (до 4.4%), *Navicula directa* (до 3.6%), *Surirella gemma* (1.5%), *Achnanthes brevipes* var. *intermedia*, *Paralia sulcata*, *Trachyneis aspera*, *Triceratium arctica*. Отмечено разнообразие видов

рода *Nitzschia* (*N. littoralis*, *N. levidensis*, *N. levidensis* var. *salinarum*, *Nitzschia plana*, *N. marginulata* и др.). Встречен широкий спектр океанических и неритических видов: арктический *Thalassiosira kryophila*, аркто- и северобореальные *Thalassiosira gravida*, *T. eccentrica*, *T. decipiens*, *Thalassiothrix longissima*, *Bacterosira fragilis*, фрагменты *Coscinodiscus oculus-iridis* и южно-бореальный *Thalassionema nitzschioides*. В вершине бухты в илах, оставленных цунами, обнаружено 27 морских диатомей (77.1%). Преобладают сублиторальные бентосные, большинство которых холодноводные *Cocconeis scutellum* (28%), *Fragilaria fasciculata* (7.5%), *Rhabdonema arcuatum* (6.6%), *Planothidium haukianum* (5.0%), *Opephora marina* (3.8%), планктонные *Navicula directa* (6.1%), *Paralia sulcata* (5.7%) и присутствует южно-бореальный *Actinocyclus octonarius*. Из неритических отмечены южно-бореальный *Thalassionema nitzschioides* и аркто-бореальный *Thalassiosira gravida*. В пробе, отобранной в 30 м от берега, увеличивается количество морских видов до 50 (53.2–82.1%). Доминируют *Cocconeis scutellum* (до 34.4%) и *Odontella aurita* (до 6.5%) – большинство с крупными створками; *Opephora marina* (до 6.3%), *Gomphonema exiguum* (до 6.2%), *Planothidium haukianum* (до 5.4%), *Arachnoidiscus ehrenbergii* (до 2%), появляются *Nitzschia levidensis*, *N. levidensis* var. *salinarum*, *N. levidensis* var. *victoriae*, *N. littoralis*, *Cocconeis pellucida*, *C. californica*, снижается численность *Paralia sulcata* (до 2%). Отмечен более широкий спектр неритических и океанических, в основном холодноводных *Coscinodiscus marginatus*, *C. oculus-iridis*, *Thalassiothrix longissima*, *Thalassiosira eccentrica*, *T. gravida*, *T. decipiens*, *T. anguste-lineata*, *T. eccentrica*, *Thalassionema nitzschioides*. Среди пресноводных встречены *Staurosira venter*, *F. subsalina*, *Staurosirella pinnata*, *Hippodonta hungarica*, *Nitzschia frustulum*, *N. dubia*, *Rhoicosphenia abbreviata*, *Navicula cari*, *N. perminuta*, *N. rhychocephala*, обитающие в водоемах разного типа. Увеличение численности видов, характерных для проточных вод – *Rhoicosphenia abbreviata*, *Meridion circulare*, *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae*, *Diatoma hyemalis* и др., свидетельствует об активном перетолжении аллювиальных отложений. В покровах илов на поверхности болот доминируют *Pinnularia lagerstedtii*, *P. ignobilis*, *Navicula cincta*, *Luticola mutica*, обитающие на слабо увлажненных поверхностях.

В осадках цунами, взятых со льда в бухтах Крабовая и Отрадная, встречено 10 видов бентосных фораминифер. Доминантом является *Jadammina macrescens* (до 79%), обитающий на маршах в приливно-отливной зоне [28]. На о. Шикотан этот вид обнаружен на литорали в закрытых бухтах, характерен для обстановок умеренной волновой энергии, переносит распреснение [7]. Отмечены агглютинирующие формы рода *Trochammina* (*Tro-*

максимума и потеряла свою энергию. Во всех случаях осадки лежат на прошлогодней траве без видимых следов размыва. В отличие от Японии, где в течение полугода после прохождения цунами наблюдалась активное переотложение цунами-генного материала [18], на Курилах эти процессы не были активными. Осадки цунами, лежащие на поверхности торфяников, влажные, перевевания и размыва не происходило. Осадки повсеместно активно зарастают травой.

На о. Кунашир цунами почти не оставило осадков, маломощный слой песка, который был на льдинах в б. Южно-Курильская, обнаружить через полгода не удалось. На юге Малой Курильской гряды осадки цунами встречены на о. Зеленом и Танфильева.

Гранулометрические характеристики песков хорошо выдержаны, при продвижении вглубь суши увеличивается примесь алеврита при сохранении размерности модальных фракций, средний размер зерен меняется мало. В алевритовых покровках при продвижении вглубь суши также сохраняются размер моды, соотношение других фракций по профилю перераспределяется без четких закономерностей. Иногда вглубь суши увеличивается примесь крупного алеврита или мелкозернистого песка и кривые становятся бимодальными, иногда количество пелитовых фракций растет вблизи уреза воды. По-видимому, это связано с переносом материала на льдинах, что усложнило картину осадения из суспензии. Интересно отметить, что мода 20–30 мкм хорошо выдержана в цунами-генных илах из разных бухт, что говорит об общих закономерностях осадения материала из суспензии.

Сравнение гранулометрического состава осадков Тохоку цунами и цунами 1994 г. показывает, что в осадках цунами 1994 г. больше крупных фракций, как правило, они полимодальные [9]. Вероятно, это связано с тем, что цунами 1994 г. было более сильным и вызвало большую эрозию, материал поставлялся с большей территории из разных источников, в том числе перерабатывался склоновый материал.

Гранулометрический состав осадков Тохоку цунами во многом унаследован от источников материала. В открытых бухтах цунами откладывало хорошо сортированные пески, близкие по структуре к осадкам пляжа, осушки и верхней части берегового склона, которые и являлись их источником. Алевропелиты откладывались волной цунами в закрытых бухтах, где их источником являлись донные илы и материал, эродированный из континентальных отложений. Одномодальные гранулометрические кривые распределения свидетельствуют о переотложении материала из одного источника, би- и полимодальные кривые характерны для осадков цунами, имеющих несколько

источников материала. Причем, в закрытых бухтах основным источником илистой фракции в осадках Тохоку цунами являлись переотложенные морские осадки, что обычно не характерно для осадков цунами на побережьях другого геоморфологического строения, где тонкая фракция обычно имеет континентальный источник [18, 27].

Видовой состав бентосных фораминифер в осадках показывает, что цунами захватывало материал с верхней части берегового склона. Встречены только сублиторальные виды, многие из которых живут в волноприбойной зоне или на маршах. Количество и разнообразие видов бентосных фораминифер, изученных из осадков цунами закрытых бухт о. Шикотан, намного ниже по сравнению с о. Кунашир. Отличается и видовой состав фораминифер. Хорошая сохранность раковин говорит об их недалеком переносе в условиях слабого турбулентного потока. Такая картина наблюдается при небольших величинах заплеска. При заплесках более 10 м в осадках обычно встречаются раковины плохой сохранности и сильно окатанные. Так, в осадках Симуширского цунами 2006 г. были обнаружены бентосные фораминиферы с толстыми фарфоровидными стенками, принесенные с литорали, а также виды, обитающие на открытом шельфе и континентальном склоне (на глубинах от 50 до 1000 м) [11]. В осадках Индонезийского цунами 2004 г. на о. Симелу доминировали бентосные фораминиферы – обитатели коралловых рифов, лагун и внутреннего шельфа, в небольшом количестве цунами захватывало материал и с больших глубин, об этом свидетельствуют находки раковин бентосных фораминифер, обитающих на внешнем шельфе и континентальном склоне [8].

В осадках Тохоку цунами на Южных Курилах обнаружены богатые диатомовые комплексы, представленные смесью морских и пресноводных диатомей разной экологии, что характерно для осадков цунами [16, 20–22, 27]. Среди морских диатомей (всего 135 видов) преобладают сублиторальные бентосные формы, что свидетельствует о поступлении материала с подводного берегового склона. Створки диатомей хорошей сохранности, в отличие от осадков цунами с высокими заплесками, где обычно встречаются фрагменты диатомей [16, 20, 27]. Обращает внимание наличие крупных створок (более 30 мкм) таких видов, как *Cocconeis scutellum*, *Odontella aurita*. Часто встречаются диатомеи в колониях, что свидетельствует о слабой турбулентности потока. Возможно, именно нахождение диатомей в колониях способствовало массовому осадению створок, в том числе видов с мелкими створками. В стратифицированных осадках в более грубых прослоях преобладают морские бентосные виды, в более мелкозернистых увеличивается доля планктонных видов. Эта же закономерность была отмечена для осадков цунами Индийского океана 2004 г. в Таиланде

[27]. Установлено различие в составе глубоководных видов, отличающихся температурным режимом обитания. В осадках цунами, отобранных на тихоокеанской стороне о. Шикотан, на фоне преобладания холодноводных видов часто встречаются южно-бореальные, в осадках со стороны Южно-Курильского пролива тепловодные виды почти отсутствуют. Возможно, волна цунами при подходе и огибании острова захватывала разные водные массы.

В цунамигенных осадках присутствуют и пресноводные виды диатомей, характерные для разных обстановок, поступившие при размыве различных континентальных отложений. В случае, если размывался преимущественно один тип отложений, преобладают диатомеи с близкой экологической принадлежностью.

В последнее время при изучении цунамигенных отложений стал использоваться спорово-пыльцевой анализ, который является одним из основных методов для оценки экологических последствий цунами в прошлом [24]. Для понимания информативности полученных данных важно знать закономерности формирования палиноспектров в осадках современных цунами. Палинологические исследования были проведены для тонких осадков Тохоку цунами о. Шикотан, отобранных в конце вегетационного сезона. Преобладает пыльца и споры растений, широко распространенных в растительном покрове острова, где развиты темнохвойные с участием березы, ольхи, ольховника и незначительного количества широколиственных. Такой состав таксонов отражает как структуру спорово-пыльцевого дождя вегетационного сезона 2011 г., так и состав пыльцы и спор, переотложенных из эродированных верхнеголоценовых отложений. Среди пыльцы трав, кустарничков и спор также преобладает пыльца локальной растительности. В отличие от субфоссильных спектров цунамигенные осадки содержат большое количество пыльцы можжевельника, что можно объяснить его высокой пылеценосностью в этот год. Аллохтонная пыльца (до 23%), представленная кедровым стлаником, соснами, криптомерией, дубом, грабом, лещиной могла заноситься как ветром, так и волной цунами.

Величина заплеска цунами была близка к заплеску экстремальных штормов, связанных с прохождением глубоких циклонов 2006–2007 гг. [2], в отдельных бухтах проникновение цунами было даже меньше. Несмотря на близкие величины заплеска, седиментологический эффект цунами коренным образом отличался от проявления сильных штормов. Во время штормов, сопровождавшихся нагоном, был образован мощный (до 0.7 м) покров наносов грубообломочного состава, локализованный узкой полосой в районе первого штормового вала. Цунами при тех же величинах заплеска

практически не сопровождалось эрозией и в большинстве бухт не оставило осадков, только редкие валуны и гальку. Например, в б. Церковная (о. Шикотан) во время шторма был образован покров песка мощностью до 0.5 м. Цунами 1994 г., заплеск которого был 5–8 м, дальность проникновения 180 м [3, 4, 6, 29], оставило слой песка мощностью до 1 см [9]. Заплеск Тохоку цунами в этой бухте был до 3 м, и цунами осадков не оставило. В закрытых бухтах осадки штормов залегают узкой полосой около уреза, во время цунами здесь образовались протяженные покровы тонкого материала.

Гранулометрический состав осадков цунами и штормов в одних и тех же бухтах также сильно отличается. Осадки цунами более тонкозернистые, содержат примесь алевролита и пелита. Во время цунами материал поступал как со дна бухт, так и за счет эрозии и переработки континентальных разнофациальных отложений. Во время штормов материал переоткладывался в прибойной зоне и шла интенсивная эрозия склоновых отложений на бортах бухт, в результате чего на пляж было вынесено много неокатанного грубого материала.

Изучение последствий Тохоку цунами 2011 г. на побережье Южных Курил имеет методическое значение для палеорекоonstrukций катастрофических событий и их проявления в краевой области распространения волн. Изучение осадков Тохоку цунами позволяет сделать важные выводы при реконструкции проявления подобных сильных событий в прошлом. При изучении разрезов на побережье закрытых бухт следует обращать внимание на тонкие слойки алевропелитовых илов, обогащенных органикой, переслаивающихся с торфом, которые могут иметь цунамигенное происхождение. Подобные осадки цунами, обогащенные органикой, обнаружены в других регионах [14]. Понятным становится и механизм сохранности наиболее подробных геологических летописей в отложениях побережья закрытых бухт по сравнению с открытыми акваториями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что осадконакопление при Тохоку цунами на разных участках побережья Южных Курил имело существенные различия. В большинстве бухт, где цунами проявилось волнами умеренной высоты, следы цунами через полгода после события маркировались только полосой морского мусора, дровяшками, травой, водорослями, зостерой и пр. В открытых бухтах встречаются редкие валуны, гальки и пятна песка. Протяженные покровы тонких осадков были образованы только в закрытых бухтах о. Шикотан. Одним из факторов, влияющих на формирование покровов цунамигенных осадков даже при небольших величинах за-

плеска, было наличие здесь ледового покрова. Цунами взломало лед, что вызвало эрозию дна на мелководье и разрушение торфяников на прибрежных низменностях. Осадки цунами здесь представлены специфическими органогенными илами с большим содержанием алевропелитовых фракций. Осаждение тонкого материала связано с продолжительным стоянием воды и выпадением частиц как из придонного слоя, так и из суспензии. Осадки Тохоку цунами на Южных Курилах сильно отличаются от других прибрежно-морских фаций и осадков других современных цунами. Изучение состава бентосных фораминифер и диатомей показало, что основным источником материала были разнофациальные отложения, эродированные в пределах верхней части берегового склона и побережья. Хорошая сохранность микрофоссилий и наличие колоний бентосных морских диатомей свидетельствуют о низкой турбулентности потока и небольшой дальности переноса. Можно предположить, что с волной цунами поступили тепловодные виды диатомей и пыльца криптомерии и широколиственных, произрастающих на Японских островах.

Авторы благодарят сотрудников заповедника “Курильский” В.Н. Бойко, И.А. Неведомскую, А.Г. Савченко, С.Е. Карпенко, Ю.В. Синкевича, отобравшим осадки сразу после прохождения цунами. Благодарим всех авторов фотографий, которые были использованы в статье.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов Президиума РАН № 12-И-П4-06 и РФФИ № 11-05-00497.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аннин В.К. Распределение бентосных фораминифер на верхней литорали острова Кунашир // Океанология. 1999. Т. 39. № 2. С. 241–247.
2. Ганзей Л.А., Разжигаетова Н.Г., Харламов А.А., Ивельская Т.Н. Экстремальные шторма 2006–2007 гг. на о. Шикотан: воздействие на прибрежный рельеф и осадки // Океанология. 2010. Т. 50. № 3. С. 458–467.
3. Иващенко А.И., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А. и др. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. // Докл. РАН. 1996. Т. 348. № 4. С. 532–538.
4. 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. VIII. С. 55–73.
5. Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Проявление цунами Тохоку цунами 11 марта 2011 года на Российском тихоокеанском побережье // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 1. С. 41–64.
6. 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. Информационно-аналитический бюллетень ФССН. Экстренный выпуск, 1994. С. 5–7.
7. Преображенская Т.В., Троицкая Т.С. Фораминиферы Дальневосточных морей. Часть 1. Фораминиферы литорали Малой Курильской гряды. Владивосток: Дальнаука, 1996. 112 с.
8. Разжигаетова Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. Особенности осадконакопления во время цунами 26 декабря 2004 года на севере Индонезии (о. Симелу, побережье в районе г. Медана о. Суматра) // Океанология. 2006. Т. 46. № 6. С. 929–945.
9. Разжигаетова Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. Осадки цунами Шикотанского землетрясения 1994 г. // Океанология. 2007. Т. 47. № 4. С. 622–630.
10. Разжигаетова Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. Геологическая летопись палеоцунами на о. Шикотан (Малая Курильская гряда) в голоцене // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С. 50–66.
11. Разжигаетова Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. Осадки Симуширского цунами 2006 г.: состав и биофоссилии // Геология морей и океанов. Материалы XVIII Международной Научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 2009. Т. 1. С. 275–280.
12. Разжигаетова Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. Палеоцунами в Южно-Курильском регионе в голоцене: особенности проявления, осадки, возраст, повторяемость, воздействие на геосистемы // Вестник ДВО. 2011. № 2. С. 59–69.
13. 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. V. 284. P. 142–150.
14. Chagué-Goff C., Schneider J.-L., Goff J.R. et al. Expanding the proxy toolkit to help identify past events: lessons from the 2004 Indian Ocean Tsunami and the 2009 South Pacific Tsunami // Earth-Science Reviews. 2011. V. 107. P. 107–122.
15. Chagué-Goff C., Niedzielski P., Wong H.K.Y. et al. Environmental impact assessment of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Sendai Plain // Sedimentary Geology. 2012. V. 284. P. 66–77.
16. Dawson S. Diatom stratigraphy of tsunami deposits: Examples from the 1998 Papua New Guinea tsunami // Sedimentary Geology. 2007. V. 200. P. 328–335.
17. Dawson A.G., Shi S. Tsunami deposits // Pure and Applied Geophysics. 2000. V. 157. P. 875–897.
18. Goto K., Chagué-Goff C., Fujino S. et al. New insights of tsunami hazard from the 2011 Tohoku-oki event // Marine Geology. 2011. V. 290. P. 46–50.
19. Goto K., Sugawara D., Ikema S. Sedimentary processes associated with sand and boulder deposits formed by the 2011 Tohoku-oki tsunami at Sabusawa Island, Japan // Sedimentary Geology. 2012. P. 188–198.

20. *Grebennikova T.A., Razzhigaeva N.G., Iliev A.Ya., Kaistrenko V.M.* Diatom analysis using for identification of paleotsunami deposits // Local tsunami: notice and risk decreasing. Moscow: Yanus-K, 2002. P. 19–31.
21. *Hemphill-Halley E.* Diatoms as an aid in identifying late-Holocene tsunami deposits // The Holocene. 1996. V. 6. P. 439–448.
22. *Horton B.P., Sawai Y., Hawkes A.D., Witter R.C.* Sedimentology and paleontology of a tsunami deposits accompanying the great Chilean earthquake of February 2010 // Marine Micropaleontology. 2011. V. 79. № 3–4. P. 132–138.
23. *Kaistrenko V., Razjigaeva N., Kharlamov A., Shishkin A.* Manifestation of the 2011 Great Tohoku tsunami on the Coast of the Kuril Islands: A Tsunami with Ice // Pure and Appl. Geophysics. 2013. V. 170. № 6–8. P. 1103–1114.
24. *Minoura K., Gusiakov V., Kurbatov A. et al.* Tsunami sedimentation associated with the 1923 Kamchatka earthquake // Sedimentary Geology. 1996. V. 106. P. 145–154.
25. *Nakamura Y., Nishimura Y., Putra P.S.* Local variation of inundation, sedimentary characteristics and mineral; assemblages of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Misawa coast, Aomori, Japan // Sedimentary Geology. 2012. V. 284. P. 216–227.
26. *Simons M., Minson S.E., Sladen A. et al.* The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries // Science 17 June 2011. V. 332 (6036). P. 1421–1425.
27. *Sawai Y., Jankaew K., Martin M.E. et al.* Diatom assemblages in tsunami deposits associated with the 2004 Indian Ocean tsunami at Phra Thong Island, Thailand // Marine Micropaleontology. 2009. V. 73. P. 70–79.
28. *Sen Gupta B.K.* Foraminifera in marginal marine environments // Modern Foraminifera. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 141–160.
29. *Yeh H., Titov V., Gusiakov V. et al.* The 1994 Shikotan earthquake tsunamis // Pure and Applied Geophysics. 1995. V. 144. № 3–4. P. 855–874.

Deposits of Tohoku Tsunami March 11, 2011 in the Southern Kurils: Composition and Biofossils

**N. G. Razjigaeva, L. A. Ganzey, T. A. Grebennikova, E. D. Ivanova,
M. S. Lyashevskaya, A. A. Kharlamov, V. M. Kaistrenko**

The Tohoku tsunami deposits were studied on the Kunashir, Shikotan, Zeleniy, Yury, Tanfiliev islands. The data for sediments sampled immediately after the event from the ice, and after half a year and a year and half later coinciding with the run up height measurements and a description of inundation zones. Covers of sands and silts are found only in closed bays that had ice cover. Tsunami waves broke the ice, which caused even for small run up erosion of the bottom and the destruction of peatbogs in the low-lying coastal areas. The grain size composition of the deposits and benthic foraminifera, diatoms, pollen complexes were studied. Association of foraminifera from tsunami deposits reflect the presence of the benthic microfauna inhabiting in the coastal zone. Among the marine diatoms sublittoral benthic forms dominated, there are some sublittoral plankton, neritic and oceanic species. Pollen spectra include pollen and spores of a local island vegetation, allochthonous pollen transferred by tsunami wave and wind from adjacent areas and redeposited taxa of Late Holocene deposits eroded by the tsunami. The re-examination of tsunami deposits was carried out to understand how they reserved.