

УДК 551.21

СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НОТО ЦУНАМИ (01.01.2024 г.) В УСЛОВИЯХ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ПОБЕРЕЖЬЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

© 2025 г. Н. Г. Разжигаева^{1, *}, Д. Г. Тюняткин¹, Л. А. Ганзей¹, Т. А. Гребенникова¹,
Е. Д. Иванова¹, Ю. Р. Путинцев¹, Ю. Ю. Жабыко², Д. Р. Шпачук^{1, 3}, Е. И. Стасюк³

¹ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

² «Приморское УГМС», Владивосток, Россия

³ Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Владивосток, Россия

* e-mail: nadyar@tigdvo.ru

Поступила в редакцию 19.07.2024 г.

После доработки 30.07.2024 г.

Принята к публикации 22.11.2024 г.

Проведено обследование зоны затопления Ното цунами в бухте Преображения (Восточное Приморье) в конце января и апреле 2024 г. До цунами внутренняя часть бухты начала замерзать, образовался припай, а на акватории — дрейфующий лед. Несмотря на небольшую величину волны и высоту заплеска (20–60 см по результатам тахеометрической съемки), в бухте образовался протяженный покров илов на невзломанном припае и сильно консолидированном льде, а в краевой части — захватывавший берег (от 1.5 до 26 м). Общая протяженность покрова илов 325 м. По льду водотока цунами проникло до 680 м от устья, покров и пятна ила встречены до 250 м. Особенности распространения волны зафиксированы по положению стеблей наземной травы и валиков из зоостеры и обрывков водорослей. Изучены гранулометрический состав илов и биофоссилии (диатомеи и бентосные фораминиферы). Проанализированы изменения структуры осадков и соотношение экологических групп биофоссилий по профилям. Среди диатомей преобладают эпифиты. Бентосные фораминиферы представлены в основном агглютинирующими формами. Источником материала являлись литораль и сублитораль, где шла активная эрозия донных осадков водой, насыщенной льдинами. Обсуждается значение результатов для поиска палеоцунами.

Ключевые слова: заплеск цунами, осадконакопление, эрозия, цунамигенные илы, гранулометрический состав, диатомеи, бентосные фораминиферы, бухта Преображения, юг Дальнего Востока

DOI: 10.31857/S0030157425020112, EDN: DYXVLL

1. ВВЕДЕНИЕ

Цунами, подходящие к побережьям с наличием дрейфующих и паковых льдов, — довольно редкие события, их разрушительная сила при одинаковых величинах заплеска намного превышает воздействие обычных волн цунами на береговую зону, поэтому такие события в умеренных и северных широтах в морских бассейнах с мощным припаем и ледовыми покровами должны привлекать повышенное внимание [5, 6, 26]. В северо-западной части Тихого океана к таким историческим событиям относятся цунами 14.04.1923 г., ярко проявившееся в окрестностях г. Усть-Камчатка (Камчатка, высота заплеска 11 м в районе Усть-Камчатка и до 20 м в районе м. Шубертова) [9, 10, 15, 16, 29, 34], Токачи-Оки цунами

04.03.1952 г. на Восточном Хоккайдо и Тохoku цунами 11.03.2011 г., достигшее в периферийной зоне замерзших бухт Южных Курил [26]. Тохoku цунами, разрушившее ледяной покров в закрытых бухтах о. Шикотан, при незначительных заплесках (1.5–2 м) вызвало сильную эрозию и привело к формированию покровов специфических цунамигенных илов и заиленных песков на низменных заболоченных берегах [12, 31, 32]. Ното цунами, сильнейшее мелкофокусное цунами в Японии после Тохoku цунами [23], также проявилось на побережье Приморья, как цунами, во время которого на побережье и в ближней акватории были ледяные припаи и паковые льды.

Цунами 01.01.2024 г. было вызвано землетрясением (M_{JMA} 7.6; 7:10:22.5 UTC), эпицентр

которого находился на п-ове Ното (префектура Исикава), на глубине 16 км [23]. Землетрясение вызвало косейсмический подъем (до 2–4 м) в северо-западной части п-ова Ното, большое число (316) оползней [35], деформации земной коры на дне Японского моря (сейсмические сдвиги по активным разломам составили 3.2–3.5 м) и сильное цунами, проявившееся на всем западном побережье Японии [23]. Цунами могло быть усилено за счет крупного подводного оползня в заливе Тояма [35]. Высота заплеска составила 3–4 м (города Сузу и Ното), 1–2 м было в г. Тояма и 4–5 м в г. Наоэцу (Naoetsu) (префектура Ниигата); зона затопления достигала 300 м [35]. Цунами вызвало разрушения в префектуре Исикава, а также соседних областях префектур Тояма и Ниигата. Особенно большой ущерб был нанесен поселениям на п-ве Ното (города Сузу, Вадзима, Ното и Анамидзу). В результате землетрясения погибло более 240 человек, 2 человека погибло во время цунами [35]. По наблюдениям Приморского УГМС цунами достигло побережья Приморья в 18:14–19:44 по местному времени (8:14–9:44 UTC), колебания уровня моря были записаны мареографами на 6 постах “Приморского УГМС”. Осадочный покров цунами был сформирован только в закрытой бухте Преображения, где цунами взломало ледяной покров. По данным Центра наблюдения и предупреждения о цунами ФГБУ “Приморское УГМС”, высота волны здесь составила 63 см.

Цель данной работы — выявить особенности осадконакопления при прохождении цунами с небольшой высотой в закрытой акватории с ледяным покровом. Задачи включали измерение величины заплеска в разных частях бухты; выявление следов эрозии; анализ распределения осадков, их структуры; определение видового состава биофоссилий, что позволяет установить, с каких глубин выносился материал, включает ли микрофлору и микрофауну из открытой части моря.

2. РАЙОН РАБОТ

Бухта Преображения расположена в 670 км от эпицентра землетрясения п-ова Ното (Noto Peninsula earthquake). Эта акватория закрытого типа является частью более крупной открытой бухты Соколовская (рис. 1). Пролив довольно узкий (360 м), около входа в бухту расположен небольшой о. Орехова. Бухта разделена небольшими мысами с причалами на две части. В узком месте ее ширина уменьшается до 196 м. Во внутренней части бухты на северном борту есть искусственная дамба. Глубины на выходе из бухты дости-

гают 11–12 м, во внутренней части — до 5–6 м. На дне хорошо выражены два подводных каньона, направленных от устья водотока, от которого идут две ветви стока, огибающих два небольших аккумулятивных островка. Вдоль берегов развит обширная литораль шириной до 100 м, около устья ручья — до 300 м, на осушке около островков хорошо выражены подводные ложбины стока. Во внутренней части бухты берега сильно заболочены, пляжей нет. В вершине бухты вдоль ручья на низких отметках тянется до 500 м низинное ветвиновое болото с участками, занятыми осоковыми сообществами, далее уклоны повышаются, но долина также сильно заболочена вплоть до водораздела на абс. высоте 42 м. В нижнем течении водоток сильно меандрирует. В приустьевой части русло врезано в морские илы и напоминает эстуарий. На дне бухты в приустьевой зоне развиты густые заросли взморника морского (*Zostera marina*) — зостеры. В мористой части бухты на мелководье распространена водоросль ульва продырявленная (*Ulva fenestrata*). В открытой части — бух. Соколовская — есть морские огороды, выращивают ламинарию, морского гребешка. Ледяной покров на акватории бух. Преображения появляется в ноябре и держится до конца марта — начала апреля [8].

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследование зоны затопления проводилось 25–26 января и 11–12 апреля 2024 г. Во время экспедиций выполнена тахеометрическая съемка береговой зоны и мониторинговые обследования бухты Преображения с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультироторного типа (GeoScan 401). Тахеометрическая съемка выполнялась электронным тахеометром точного класса (South N3). В процессе съемки визуально по косвенным признакам (наличие водорослей, ила и др.) определялась граница зоны заплеска, по линии которой и располагались точки съемки (рис. 1). Съемка была проведена по обоим берегам верхней части бухты, включая устьевую часть водотока, впадающего в бухту Преображения. Применение БПЛА было обусловлено необходимостью получения общей пространственной информации о произошедшем явлении и его последствиях на изучаемой территории (рис. 1). В результате были получены изображения, послужившие растровой основой для наложения результатов тахеометрии. В процессе обработки данных, полученных с помощью полевых геодезических работ, были проведены картирование

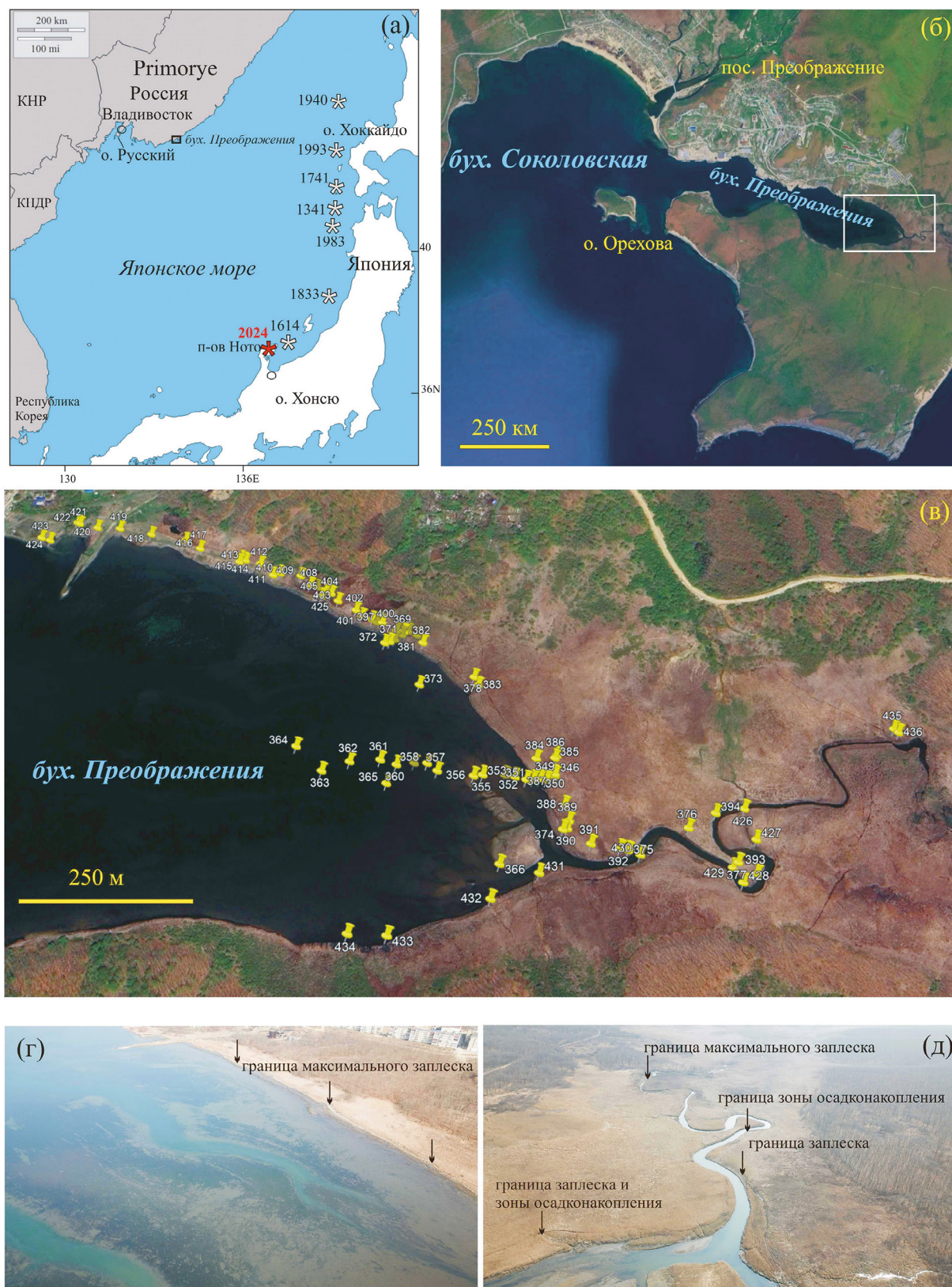


Рис. 1. Район исследований: *а* – положение района работ в Япономорском регионе с очагами исторических цунами; *б* – бухты Соколовская и Преображения с участком, на котором проводилось обследование зоны затопления Ното цунами; *в* – кутовая часть бухты Преображения с точками наблюдений (т. н.) – места отбора осадков и координаты границы заплеска; *г* – северный борт бухты и дно с линейными следами эрозии; *д* – зона затопления цунами по водо-току, стрелками показаны границы зоны осадконакопления и максимального заплеска.

зоны затопления с применением специализированного лицензионного геодезического программного обеспечения и определение координат максимальных отметок проникновения цунами за пределы зоны осадконакопления по всей территории проявления цунами. Таким образом была определена высота и глубина заплеска. Далее высота заплеска скорректирована на средний уровень моря с учетом приливо-отливных колебаний.

В январе пробы осадка отбирались в вершине бухты: 1) по профилю, пересекающему вкрест зону затопления цунами, включая припай с покровом осадков и льдинами и берег до уровня максимального заплеска; 2) в верхней части зоны затопления на северном борту; 3) по замерзшему руслу водотока до максимального распространения льдин, вынесенных цунами (рис. 1). В апреле работы проводились на побережье после того, как ледовый покров и припай растаяли. Более широко обследована зона затопления на северном и южном берегу кутовой части бухты и вдоль русла водотока с описанием распространения и отбором осадков в разных частях зоны заплеска. В январе отобрано 32, в апреле — 23 пробы цунамигенных осадков и 2 пробы ила с литорали. Выполнены гранулометрический анализ цунамигенных илов на седиентографе Analysette 22 (ЦКП ТИГ ДВО РАН). Анализ 2 проб песков сделан на ситах с шагом γ . Микропалеонтологические исследования включали диатомовый и фораминиферовый анализы, выполненные для проб, отобранных в январе. Фораминиферы определялись также в илах с верхней литорали. Анализы выполнялись по стандартным методикам. Определены концентрации створок диатомей и раковин бентосных фораминифер. Экологические предпочтения диатомей приведены согласно [14, 18, 27]. Для определения бентосных фораминифер использовались рабо-

ты [17, 22, 28, 37]. Также определен видовой состав моллюсков, водорослей и зоостеры.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проявление цунами, величина заплеска. До цунами внутренняя часть акватории бухты (кутовая часть) наполовину была покрыта льдом, к востоку от дамбы была большая полынья, вероятно, образовавшаяся в отлив, наблюдался дрейфующий лед, в количестве 2 баллов, состоящий из темного ниласа, до 5 см толщиной, различной сплоченности. У берегов в восточной части бухты был развит припай из серо-белого льда (толщиной 15–30 см) (рис. 2а). Цунами вскрыло и раздробило лед (о чем свидетельствует космоснимок за 06.01.2024 г.), припай сохранился только в вершине бухты (около устья водотока и остался более широким по южному борту) (рис. 2б). Количество дрейфующего льда уменьшилось до 1 балла, в связи с частичным выносом льда на берег. В восточной части бухты наблюдался дрейфующий очень сплоченный лед, состоящий из темного ниласа и мелкобитого серо-белого льда (от 2 до 20 м), сплоченность которого составила 9–10 баллов, быстро превратившийся в припай.

По данным автоматического пункта цунами (АП) “Преображение” Центра наблюдения и предупреждения о цунами ФГБУ “Приморское УГМС”, высота волны цунами составила 0.63 м, размах колебаний уровня моря 0.42–0.34 м наблюдался в бухте около суток, далее пошел на спад.

В январе зона затопления (рис. 3а, б) хорошо маркировалась по обломкам льдин и покрову темно-серого ила с обилием зоостеры и единичными обрывками водоросли *Ulva fenestrata*. Встречались льдины с вмержшей зоостерой и вмержшим илом (мощность до 5–6 см), вынесенные с верхней сублиторали (мористого края осушки) (т. н. 20/365, 22/368) (рис. 3в, г). Размер льдин достигал 2–3 м.



Рис 2. Изменение ледовой обстановки: а — до (01.01.2024 г., 02:01 UTC) и б — после Ното цунами (6.01.2024 г., 02:01 UTC). Ледовая обстановка — по данным ДВ Центра ФНБУ “НИЦ Планета”.

Протяженность поля илов составила 325 м, большая часть лежала на припае. Вглубь суши волна проникла до 10–12 м, в кутовой части — до 23 м, а по льду реки распространилась до 680 м: льдины и осадок встречены на расстоянии 250 м от устья (рис. 3д, е), а зостера обнаружена на мосту и в 3 м выше по течению (рис. 3м). Суммарный горизонтальный заплеск цунами от кромки припая (обра-

зованного в том числе и за счет сплоченного льда) до максимального проникновения по реке был около 1 км. Вертикальный заплеск по данным тахеометрической съемки составил 20–60 см. В мористой части зоны заплеска на припае цунами-генный ил, принесенный в начале цунами, был покрыт слоем чистого льда, что свидетельствует о повторном затоплении припая на расстояние



Рис. 3. Зона затопления Ното цунами в бух. Преобразования (*а–е* — в январе, *жс–м* — в апреле 2024 г.): *а* — кутовая часть бухты, покров илов и льдины на припае; *б* — осадочный покров и перекрывающий лед в зоне затопления; *в* — перевернутая льдина с вмержшим осадком; *г* — на переднем плане льдина с обилием вмержшей зостеры; *д* — льдины, вынесенные цунами в устье водотока; *е* — зона затопления с льдинами и пятнами ила по руслу водотока; *жс* — зона затопления на северном борту бухты с покровом и пятнами ила, лежащая трава показывает направление прямого и обратного потоков; *з* — покров ила на траве около уреза; *и* — пятно ила на месте растаявшей льдины; *к* — следы водоворота, направленного против часовой стрелки; *д* — зона затопления на южном борту бухты; *м* — граница максимального заплеска около моста через водоток (т. н. 436).

до 270 м (рис. 3б). В апреле, после того, как ледовый покров растаял, зона затопления также хорошо выделялась (рис. 3ж–л). Валики из zostеры хорошо маркируют линию максимального заплеска. На южном борту есть участки берега, где количество валиков достигает 3–4, что показывает линии заплесков, возникшие при многократных колебаниях уровня воды в бухте. На бортах бухты горизонтальный заплеск был до 8–9 м. На северном борту по валику zostеры хорошо выделяются фестоны (5 × 10 м) и отдельные “языки” заплеска (до 10–12 м) вглубь суши. Зона проникновения воды в некоторых местах на 2–3 м дальше зоны осадконакопления, трава здесь покрыта тонкой пленкой ила.

По положению травы хорошо восстанавливаются направления прямого и обратного потока (рис. 3ж), по северному борту бухты за дамбой хорошо видны следы водоворотов (диаметром до 2–3 м) — трава направлена против часовой стрелки (рис. 3л). По периметру таких “кругов” залегает мат zostеры с участием *Ulva fenestrata*, в центре лежит покров ила. В центре бухты в приустьевой зоне водотока трава наклонена по направлению прямого потока. Выше по течению реки хорошо выделяются места, где шел и прямой, и обратный поток — стебли вейника направлены то вверх, то вниз относительно течения водотока. Такие участки показывают, что поток морской воды выходил за пределы замерзшего русла на поворотах.

Распределение осадков, следы эрозии. В январе на льду обнаружен сплошной покров осадков (рис. 3а), мощность, как правило, была 5–8 мм, максимальная (1–1.5 см) отмечена на припае в 210–280 м вглубь зоны затопления (у берега) (т. н. 5/350–11/356). В мористой части заплеска слой осадка был 3–5 мм и местами отмечена только пленка ила. На берегу в вершине бухты т. н. 1/347, 2/348 осадок, выпавший из воды, покрывал льдины (слой 5–8 мм) и был обнаружен на траве (пленка 3–4 мм). На отдельных льдинах обнаружен осадок (мощностью до 5–6 см), который был вмержшим в лед до цунами и перенесен с льдинами (рис. 3в). На льду реки слой ила (до 5–8 мм) встречен на расстоянии 250 м от устья, до большого меандра (рис. 1).

В апреле после таяния льда покров ила сохранился фрагментарно, на большей части зоны затопления сухой осадок лежал пятнами на траве или образовывал пленку на листьях (рис. 3ж, з). Зона осадконакопления протягивалась по периметру кутовой части бухты от дамбы на северном берегу до устья водотока и далее распространялась до 600 м на южном борту, доходя до участ-

ка берега, где близко подходит крутой склон. К западу от дамбы следы заплеска были только в небольшой карманной бухточке (т. н. 55/423, 56/424), где в 10–12 м от берега встречен мат из zostеры, а на контакте с осушкой на поверхности торфяника около уступа размыва (высотой 50 см) обнаружено два пятна песка (4 × 1.5 м, мощностью 3–5 см) с дресвой, щебнем и раковинами моллюсков. Встречены моллюски, обитающие в приливно-отливной зоне на песчаных осушках: субтропическо-низкобореальный *Ruditapes philippinarum*, *Protothaca euglypta*, *Musculista senhousia*, а также *Littorina* sp. Первые три вида теплолюбные, бухта Преображения находится около северной границы их распространения.

Мощность слоя ила в зоне затопления, как правило, составляла от 1–3 до 5 мм, максимальную толщину (до 1–1.5 см) осадок имел в пониженных участках болота (ложбинах стока) и в покрове вблизи дамбы. Местами встречались пятна ила, оставшиеся после таяния льдин и сохранившие проекцию их поверхности (рис. 3и). Возможно, мозаичность осадочного покрова на контакте литорали и берега также образовалась после таяния льдин. На островке в устье реки местоположение растаявших льдин фиксируется по скоплению zostеры.

При небольшой высоте волны взлом и дробление ледяного покрова многократно усилили эрозию донных осадков. На снимках с воздуха хорошо видно, что на дне выделяются полосы, лишенные водной растительности, направленные к вершине бухты. Скорее всего, эти борозды образовались при дроблении ледяного покрова и выносе льдин в вершину бухты на сплоченный лед и остатки припая.

Следы эрозии на суше встречались редко. На северном борту найдены небольшие углубления (50 × 100 см, глубиной до 20 см), ориентированные параллельно берегу, возможно, оставленные обратным потоком с льдинами. Местами поверхность зоны затопления сильно бугристая, что свидетельствует о высокой турбулентности потока.

Гранулометрический состав цунамигенных илов довольно однородный. Преобладает мелкий алеврит (46–77%), примесь пелитовых частиц составляет 19–36%, причем есть частицы < 1 мкм (до 4.6% на максимуме заплеска по северному борту), мелкого песка — как правило < 3% (рис. 4). Более высокая примесь песка (5–14%) отмечена в осадках на льдинах, в осадках, оставшихся после таяния льдин около устья, и в осадках южного борта, где идет подача склонового материала

и донные осадки включают большую примесь песчаных фракций. Кривые распределения имеют одну хорошо выраженную моду (25–36 мкм) и асимметричное “плечо” за счет существенной примеси пелитовых фракций (рис. 4а). За счет большого количества тонкозернистой примеси коэффициенты асимметрии положительные. В редких случаях состав бимодальный и полимодальный — на кривых, помимо основной, выделяются моды 3.5–4 мкм и 90–115 мкм (рис. 4б, в). Илы с бимодальными кривыми встречаются в покрове в мористой части заплеска (в 100–140 м от начала заплеска на припае (т. н. 14/359–16/361) и в зоне с максимальной толщиной покрова (т. н. 5/350, 9/354), где дольше стояла вода и больше примесь частиц < 5 мкм (до 24%). Ил с полимодальными кривыми распределения обнаружен на льдинах на берегу в приустьевой зоне (т. н. 2/347) и в покрове на южном борту (т. н. 58/432), где примеси относительно крупных фракций выше. Наиболее сортированный материал встречен у границы зоны осадконакопления на льду водотока (рис. 4г). На северном борту ближе к посел-

ку в осадках цунами встречается дресва (до 2 см) и уголь. Вмерзший до цунами в льдины ил отличается по гранулометрическому составу. Здесь отмечено наиболее высокое содержание пелита (до 54%), и особенно частиц < 5 мкм (40%), кривая распределения бимодальная, моды 20–30 и 2–3 мкм (т. н. 20/365). Осадок на осушке имеет такую же структуру, как и цунамигенные илы (рис. 4д, е). Такой же состав имеет и вмерзший в льдину осадок в т. н. 27/373, по-видимому, перенесенный с верхней сублиторали.

Распределение гранулометрических характеристик илов по профилю от кромки припая к берегу отличается (рис. 4) от закономерностей, обычно наблюдаемых для покровов цунамигенных отложений, где типично утоньшение размерности материала вглубь суши [20, 25], хотя такая закономерность не всегда ясно проявляется [19]. Ширина зоны затопления в бух. Преображения значительная, но здесь не было типичной дифференциации частиц. Мода и средний размер зерен осадка мало меняются по профилю, минимумы отмечены в 100, 140 м от начала заплеска (14/359,

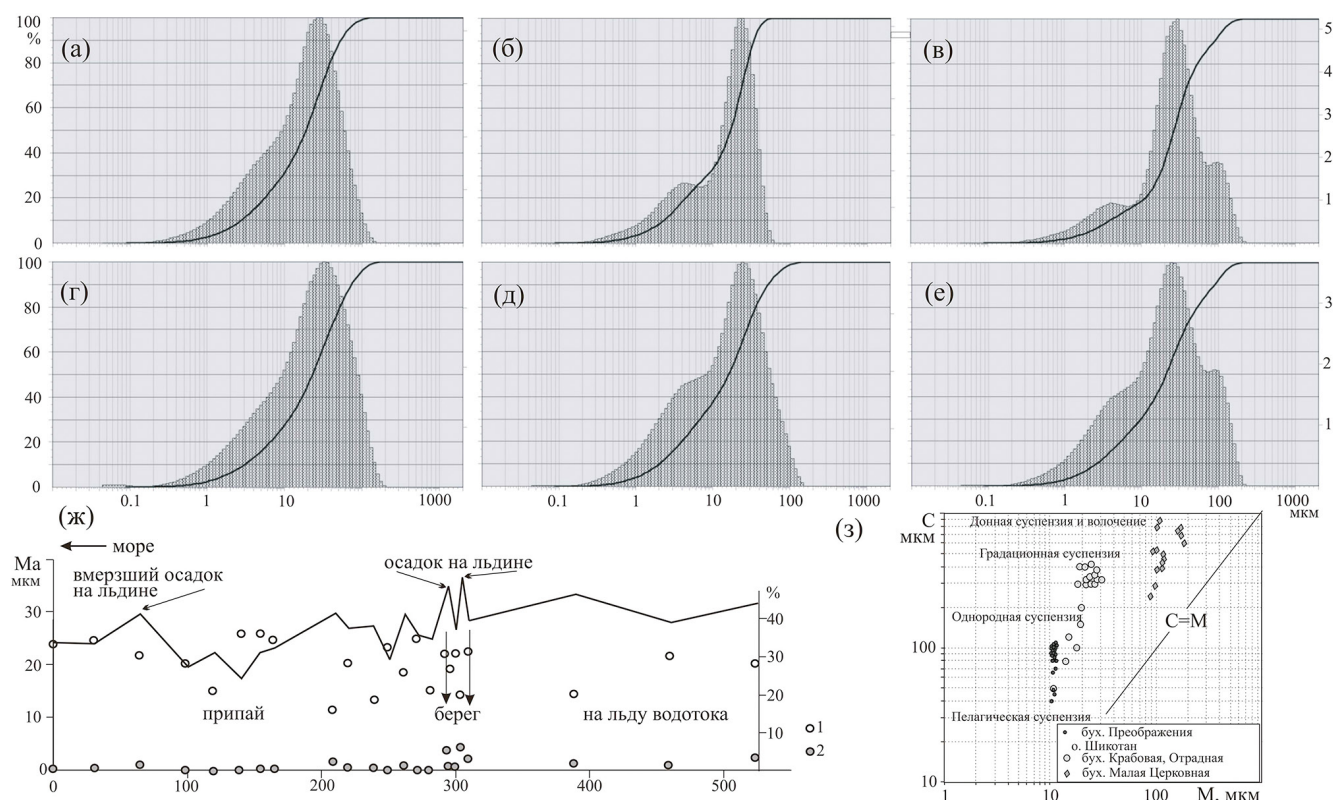


Рис. 4. Гранулометрические характеристики цунамигенных осадков в бух. Преображения: а–е — типичные гранулометрические кривые распределения и кумулятивные кривые; а–в цунамигенные илы, покров на припае и берегу бухты; г — цунамигенный ил на границе зоны осадконакопления на льду водотока; д–е — осадки литорали; ж — изменение среднего размера частиц (Ма), содержания фракций пелита и мелкого песка по профилю на припае (т. н. 364–350), зоне затопления на берегу (т. н. 349–346) и на льду водотока (т. н. 375–377). Содержания фракций: 1 — <10 мкм, 2 — 100–250 мкм; з — диаграмма Пассега для цунамигенных илов бух. Преображения (Ното цунами, 2024 г.) и закрытых бухт о. Шикотан (Тохоку цунами, 2011 г.).

16/361), ближе к берегу (т.н. 3/348, 6/351, 7/252) крупность материала несколько возрастает. Более тонкий материал смывался с льдин и осаждался на поверхности припая, а более крупный с льдинами попал в зону максимального заплеска. Возможно, вода поступала и по трещинам среди сильно сплоченного льда вблизи берега и могла выносить более крупные частицы. Даже при транзите обломочного материала вместе с льдинами по замерзшему руслу водотока у границы зоны осадконакопления не отмечено утоньшение материала, наоборот примесь песка здесь несколько увеличена (3%). Сортировка материала меняется без закономерностей, что связано с высокой турбулентностью потока. На диаграмме Р. Пассега точки, отвечающие цунамигенным илам бух. Преображения, попадают в поле однородной суспензии (рис. 4з), в отличие от илов, образованных после прохождения Тохоку цунами в закрытых бухтах о. Шикотан, где была примесь более грубого материала, поступавшего с узких пляжей [12, 32].

Диатомовые водоросли. В осадках цунами обнаружено 205 таксонов диатомей, включающих 102 обитателя литоральной зоны моря, 13 пелагических и 91 вид пресноводных диатомей, поступающих в море с речным стоком (рис. 5). Створки сильно изломаны, что обычно характерно для сильных цунами с высокими заплесками [21]. Концентрация варьирует от 1.9 до 31.1×10^6 створок/г, максимальная зафиксирована в осадках, отобранных на льду водотока (пробы 29/375, 30/376), и в зоне максимального заплеска (32/378), минимальная — в линзе осадка, вмержшего в льдину, вынесенную с верхней сублиторали (20/365). Морские диатомеи представлены бентосными (до 97%) и планктонными видами (до 20%). По отношению к солености выделяются: морские (48 таксонов), солоноватоводно-морские (9), солоноватоводные (38), солоноватоводно-пресноводные (17). Большая часть видов малочисленны (< 2%) и только 11 видов более обильны. В осадках преобладают бентосные солоноватоводные виды (70–84%). Доминируют широко распространенные в поверхностных осадках прибрежной зоны залива Петра Великого (на глубинах до 22 м) эпифиты *Cocconeis scutellum* (до 59.6%), *C. scutellum* var. *parva* (до 22.3%). Субдоминантами (обычно < 10%) являются часто населяющие макрофиты морского побережья и соленые воды речных эстуариев *Gomphonema exiguum* var. *minutissimum*, *Gomphonemopsis exigua*, *Tryblionella punctata* [14, 18, 27]. Среди морских видов преобладают бентосный *Cocconeis costata* (до 8.6%), населяющий камни и пески на глубинах с 0.3–0.5 м

и обитающий до глубин 10 м [14]; планктонный *Paralia sulcata* (до 6%); часто населяющие камни и пески, макрофиты *Rhoicosphenia marina* (до 4%), *Ardissonea formosa*, *Amphora proteus*, *Navicula directa*, присутствует обрастатель льда *Pseudogomphonema kamtschaticum* (до 3% т. н. 5/350) [1, 14]. Встречаются фрагменты пелагических диатомей: северобореального *Coscinodiscus* aff. *oculus-iridis*, южнобореальных *C. asteromphalus*, *Thalassionema nitzschioides* и арктобореального *Thalassiosira gravida*. В составе солоноватоводно-пресноводных значительной численности достигают *Tabularia fasciculata* (до 8.1%), *T. tabulata* (до 4.7%), обитающие в приустьевой зоне. Пресноводные виды разнообразны, но встречаются в малых количествах, их суммарное содержание менее 20%. Наиболее часто встречаются озерно-реофильные *Staurosira venter*, *Staurosirella pinnata*, *Stauroforma exiguiformis*, виды родов *Navicula*, *Nitzschia*. Присутствуют озерно-болотные виды родов *Pinnularia*, *Eunotia*. В осадках, вмержших в лед (20/365; 27/373), в обилии встречена *Gomphonema exiguum* var. *minutissimum* (14.2%) и отмечено высокое содержание планктонного *Paralia sulcata* (до 15.4%). Здесь более часто встречаются фрагменты пелагических видов (*Coscinodiscus oculus-iridis*, *Thalassiosira eccentrica*, *T. gravida*, *Actinocyclus curvatulus*).

Можно выделить некоторые закономерности распределения видов в зоне затопления. На профиле в кутовой части бухты (т. н. 2/347–19/365) (рис. 5), в мористой части заплеска на припаяе, (11/356, 18/363, 17/362, 15/360) концентрация диатомей низкая (6.7–8.4 млн/г). Содержание морских видов 13.1–23.8%, доля пресноводных видов < 7%. В начале зоны заплеска (19/264) особенно высока доля эпифитов, доминантами являются *Cocconeis scutellum* (54.7%), *C. scutellum* var. *parva* (до 22.3%). В точках у берега (2/347, 3/348, 4/349, 5/350, 6/351, 7/352, 9/354, 10/355) концентрация диатомей выше (13.1–25.3 млн/г), особенно на участке, где стояла вода (т. н. 7/352) и на максимуме заплеска (32/378). Содержание морских видов снижается (10.1–14.5%), за исключением т. н. 3/348, где доминирует планктонный *Paralia sulcata* (14.3%). Содержание более мелких створок пресноводных диатомей увеличивается около границы зоны осадконакопления (до 16.5% т. н. 1/346–2/347).

На профиле на северном борту бухты (т. н. 22/368–26/372) также более высокая концентрация диатомей (19.2 млн/г) отмечена в осадке на максимальном заплеске (т. н. 22/368), в других пробах — 4–7 млн/г. Доля морских снижается в осадках вглубь суши от 15.4 до < 10%, солонова-

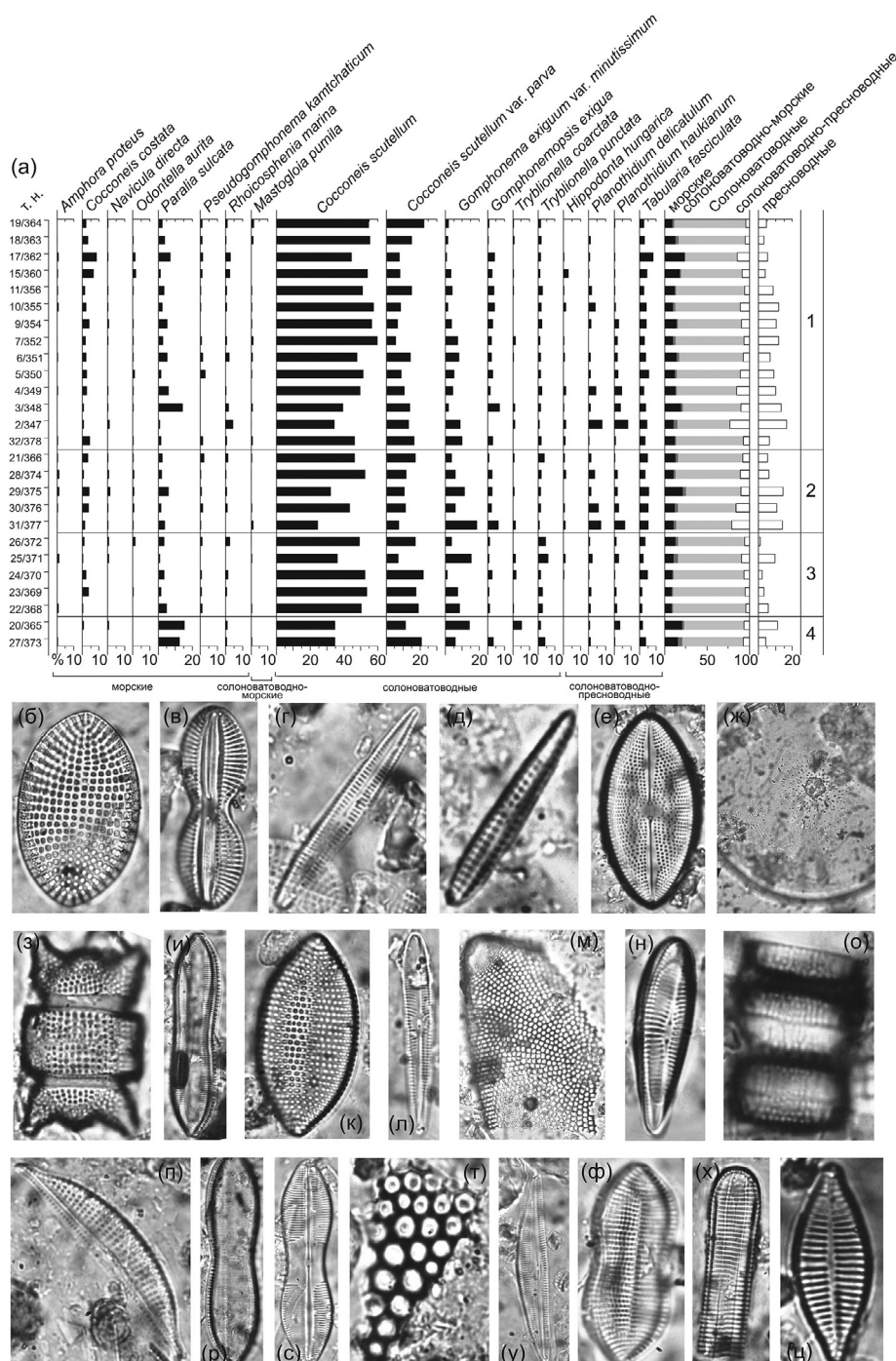


Рис. 5. Преобладающие виды диатомовых водорослей в осадках Ното цунами в бух. Преобразования: а – 1 – профиль вкост зоны затопления к берегу, 2 – профиль от приустьевой зоны по льду водотока, 3 – профиль на северном борту бухты, 4 – в осадках, перенесенных льдинами с литорали. Фото отдельных видов диатомей: б – *Cocconeis scutellum* Ehrenberg (27×18 мкм); в – *Diploneis interrupta* (Kützing) Cleve (42×18 мкм); г – *Gomphonemopsis exigua* (Kützing) Medlin (48×5.8 мкм); д – *Gomphonema exiguum* var. *minutissimum* Grunow (11×2 мкм); е – *Petronia granulata* D.G. Mann (50×26 мкм); ж – *Hyalodiscus subtilis* Bailey (132×132 мкм); з – *Odontella aurita* (Lyngbye) Agardh (32×12 мкм); и – *Tryblionella acuminata* W. Smith (72×12 мкм); к – *Tryblionella punctata* W. Smith (40×20 мкм); л – *Pseudogomphonema kamtschaticum* (Grunow) Medlin (48×5.8 мкм); м – *Trigonium caelatum* (Janisch) Mann (118 мкм); н – *Rhoicosphenia marina* (Kützing) M. Schmidt (26×7.5 мкм); о – *Paralia sulcata* (Ehrenberg) Kützing (13×24 мкм, колония); п – *Halophora coffeiformis* (Agardh) Levkov (42×14 мкм); р – *Tryblionella plana* (Smith) Pelletan (119×30 мкм); с – *Pinnularia quadratarea* var. *constricta* (Østrup) Heiden (45×14 мкм); т – *Coccinodiscus oculus-iris* (Ehrenberg) Ehrenberg (14×10 мкм, фрагмент); у – *Cymbella angusta* (Gregory) Gusliakov (49×9 мкм); ф – *Tryblionella coarctata* (Grunow) D.G. Mann (32×12 мкм); х – *Ardissonea formosa* (Hantzsch) Grunow (50×13 мкм, фрагмент); ц – *Planolithidium delicatulum* (Kützing) Round & Bukhtiyarova (Kützing) Round & Bukhtiyarova (22×8 мкм).

товодно-пресноводных < 6%, пресноводных диатомей < 6%, практически отсутствуют болотные виды родов *Eunotia*, *Pinnularia*.

На профиле по льду реки (т. н. 21/366, 28/374, 29/375, 30/376, 31/377) выделены две зоны, отличающиеся составом доминирующих видов и соотношением групп диатомей. На припае в приустьевой зоне (т. н. 28/374 и 21/366) концентрация диатомей невысокая (6.4–10 млн/г). Содержание солоноватоводных видов до 76.3%. Доля морских не превышает 13%, участие солоноватоводно-морских до 1.7%, солоноватоводно-пресноводных видов < 8%, наиболее заметного содержания (до 3%) достигают *Tabularia fasciculata*, *Planothidium delicatulum*. Содержание пресноводных диатомей < 5.4%. В т. н. 29/375, 30/376, 31/377, удаленных от берега моря вглубь суши, концентрация диатомей повышается (20–31 млн/г). Содержание бентосных солоноватоводных диатомей ниже (63.7–68.3%). Наиболее высокое содержание морских видов отмечено в т. н. 29/375 (22%), чаще встречаются пелагические диатомеи. Отмечено более высокое участие солоноватоводно-морских диатомей (*Mastogloia pumila*, *Melosira moniliformis*, *Halamphora coffeiformis* — до 3%). Доля солоноватоводно-пресноводных увеличивается от 10 до 20.9% у границы зоны осадконакопления (т. н. 29/375, 31/377). Найдены эвригалинные *Tabularia fasciculata*, *Planothidium hauckianum*, *P. delicatulum* (по 6–7%), населяющие разные субстраты в прибойной зоне на глубинах с 3–5 м [14]. Содержание пресноводных диатомей в этих точках более высокое — 14.3%. Здесь же обнаружено наиболее высокое содержание планктонных видов (8.7%). Такое распределение групп диатомей и концентрации створок указывает на существование транзитной зоны (т. н. 21/366 и 28/374) и зоны

разгрузки более мелких створок (до 10–20 мкм) у излучины реки (т. н. 29/375, 30/376, 31/377).

Учитывая, что основная масса диатомей, обнаруженных в цунамигенных осадках, представлена видами-эпифитами, можно предположить, что волна цунами захватывала материал с глубины не более 5 м, т.е. со дна внутренней части бухты. До этой глубины на побережье Японского моря произрастает наибольшее число водных растений [13]. Источником пресноводных диатомей также являются морские осадки, в которые они поступают с речным стоком. В этом отличие от крупных цунами, вызывающих сильную эрозию континентальных разнофациальных толщ в зоне затопления [21] или проходящих через пресноводные водоемы, в которых захватывается вода и материал донных осадков.

Бентосные фораминиферы. В осадках обнаружено 18 видов бентосных фораминифер, относящихся к 15 родам; 6 видов являются секреторными (известковыми) формами, 12 — агглютинирующими (песчанистыми) (табл. 1). В образцах отмечаются многочисленные остатки водорослей, панцири мелких рачков, оболочки семян наземной растительности, иногда раковины остракод. Известковые раковины, в основном плохой сохранности, стенки раковин очень хрупкие, со следами разной степени растворения. Это может свидетельствовать об агрессивной среде по отношению к карбонатным компонентам осадка. Раковины агглютинирующих видов хорошо сохранились. Общая численность раковин варьирует от 1 до 409 экз/10 г, количество видов в отдельных пробах меняется от 1 до 11 (рис. 6).

Во всех комплексах доминируют представители агглютинирующих родов *Ammobaculites*,

Таблица 1. Виды бентосных фораминифер, найденных в цунамигенных илах бух. Преображения

Секреторные формы	Агглютинирующие формы
<i>Ammonia beccarii</i> (Linnaeus)	<i>Ammobaculites exiguus</i> Cushman & Brönnimann
<i>Criboelphidium etigoense</i> (Husezima et Maruhasi)	<i>Ammotium cassis</i> (Parker)
<i>Criboelphidium kusiroense</i> (Asano)	<i>Cribrostomoides jeffreysi</i> (Williamson)
<i>Cribrononion incertum</i> (Williamson)	<i>Cuneata arctica</i> (Brady)
<i>Elphidium excavatum</i> (Terquem)	<i>Eggerella advena</i> Cushman
<i>Retroelphidium subclavatum</i> (Gudina)	<i>Jadammina macrescens</i> (Brady)
	<i>Miliammina fusca</i> (Brady)
	<i>Reophax curtus</i> Cushman
	<i>Textularia torquata</i> Parker
	<i>Trochammina inflata</i> (Montagu)
	<i>Trochammina japonica</i> Ishiwada
	<i>Trochammina voluta</i> Saidova

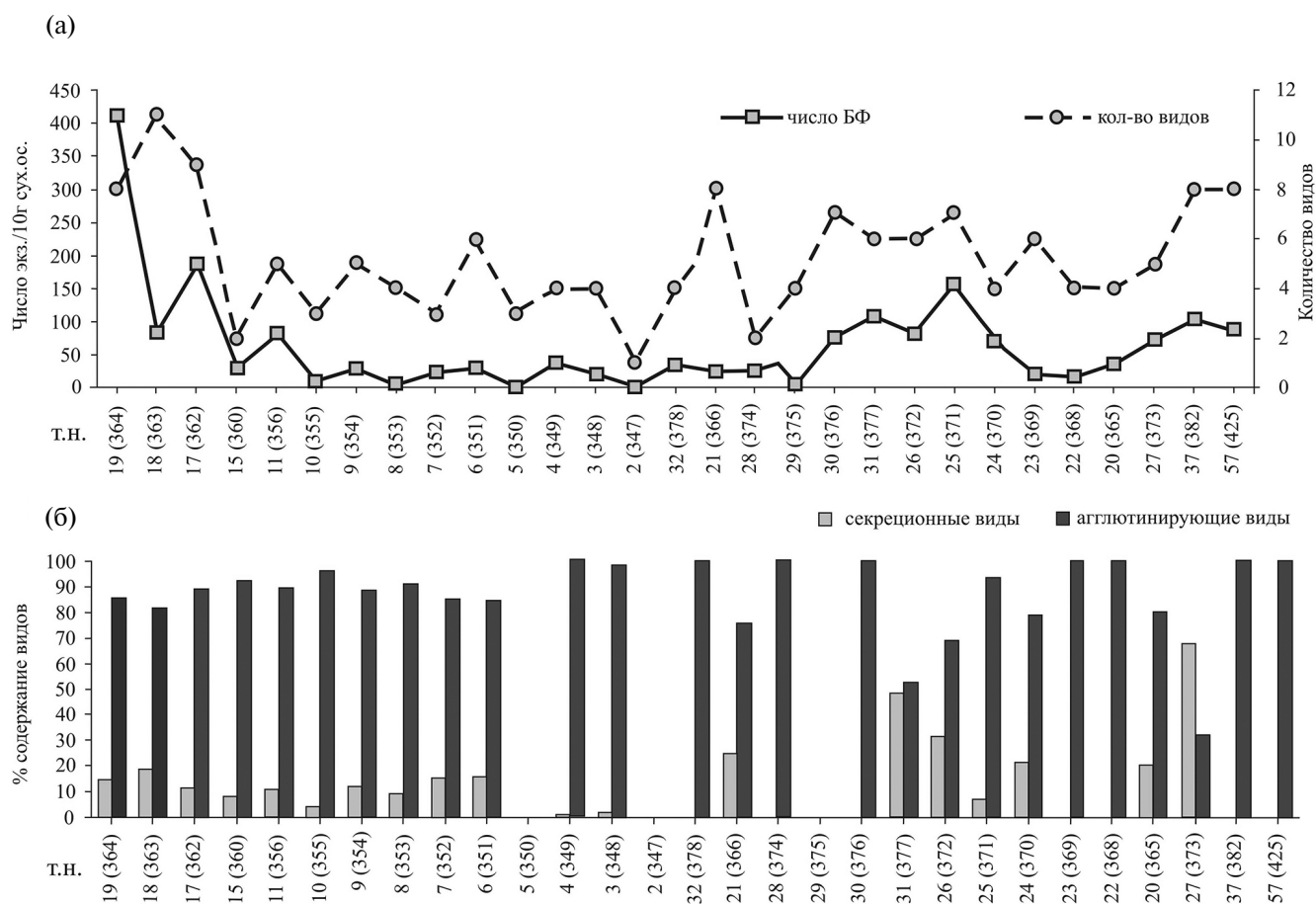


Рис. 6. Соотношение общего и относительного содержания видов бентосных фораминифер (а) и процентное соотношение секреторных и агглютинирующих форм (б) в цунамигенных илах и осадках осушки бух. Преображения

Trochammina, *Jadammina*, *Miliammina*. Большинство выделенных фораминифер относятся к мелководным формам, обитающим в прибрежной зоне в условиях незначительного опреснения [17, 30]. Такими являются *Jadammina macrescens*, *Ammobaculites exiguus*, обитающие при пониженной или неустойчивой солености; *Miliammina fusca*, *Ammotium cassis*, типичные для литорали и верхней сублиторали, и эвригалинный секреторный вид *Ammonia beccarii* [17, 30]. Наиболее обильными в осадках являются представители рода *Trochammina*, обитающие на глубинах от 0.5 до 30 м повсеместно, главным образом, в бореальных областях [2]. В осадках обнаружены также *Reophax curtus*, *Cuneata arctica*, *Eggerella advena*, характерные для более глубоких обстановок — литорали и внутреннего шельфа (глубина местообитания от 5 до 100 м). Глубины более 5 м есть и в восточной части бух. Преображения, в западной части глубины достигают 12 м.

Секреторные формы присутствуют, как правило, в небольших количествах, в некоторых образцах их нет. Большинство относятся к сублиторальным, шельфовым видам. Формы

Criboelphidium etigoense, *Criboelphidium kusiroense*, *Cribrononion incertum*, *Elphidium excavatum*, встречающиеся на глубинах от 0.5 до 72 м в зал. Петра Великого, могут обитать и на литорали. На двух т. н. (4/349, 21/366) обнаружены единичные экземпляры *Retroelphidium subclavatum*, шельфового вида, имеющего широкое распространение от 5 до 122 м.

Наиболее высокая численность и наибольшее разнообразие видов отмечены в мористой части зоны заплеска, здесь же встречено больше секреторных форм (до 27%) (рис. 4). У границы зоны осадконакопления на льду реки также несколько увеличивается численность раковин.

В целом, состав бентосных фораминифер в цунамигенных илах близок к ассоциации в осадках верхней части литорали в кутовой части бухты, но в осадках литорали нет секреторных форм. В илах, вмержших в льдины и вынесенных, вероятно, с верхней сублиторали, количество секреторных видов достигает 67%.

Цунамигенные илы: значение для идентификации палеоцунами. Изучение состава осадков современных цунами важно для понимания

особенностей осадконакопления и выделения цунамигенных фаций при поисках следов палеоцунами, изучение которых проводится для определения масштабов и частоты проявления этих событий в прошлом [20, 24]. Такие исследования необходимы для продления рядов сильных событий, оценки цунамиопасности побережья и возможных рисков. Очаги наиболее сильных цунами, достигающие берегов Приморья, расположены в восточной части Японского моря около Японских островов [36], поэтому реконструкции палеоцунами на побережье Приморья представляют большой интерес для межрегиональных корреляций сильных событий. На побережье Восточного Приморья, как правило, высокие заплески наблюдались при цунами, имевших очаги, расположенные около о. Хоккайдо [11]. Предполагается, что такую же локализацию имели и источники палеоцунами [3]. Заплески цунами от землетрясений с эпицентрами в юго-восточной части моря незначительные [7]. Следы цунами от южных источников обнаружены только на побережье бух. Триозерье — предположительно следы цунами 1026 г. [4], и на о. Русский в закрытой бухте Спокойная [33].

Обычно в закрытых бухтах Приморья вертикальные и горизонтальные заплески цунами ниже, чем на открытом побережье. В бух. Преображения во время цунами 1983 г. повышение уровня воды было на 1.2 м, в то время как в бух. Соколовской — на 3.0 м; в 1993 г. — до 1.5 м [11]. При небольших заплесках осадочные покровы обычно не образуются [20]. Главным фактором, который определил формирование покрова цунамигенных илов в кутовой части бух. Преображения, было наличие ледяного покрова и припая. Волны цунами взломали лед, что вызвало при высоте волны 63 см эрозию дна на мелководье, насыщение воды большим количеством льда и взвеси и образование протяженного покрова осадков. После таяния льда на акватории большая часть покрова цунамигенных илов исчезла. Обследование берега в апреле показало, что сохранилась узкая полоса с пятнами осадка, окаймляющая берег в кутовой части бухты (шириной до 8–10 м). По-видимому, поиск осадков палеоцунами в таких бухтах следует проводить на расстоянии первых десятков метров от уреза. В таких условиях можно найти следы цунами, имевшими невысокие заплески, и наиболее опасные для этих широт ледовые цунами. Одним из признаков прохождения цунами со льдом является плохая сохранность створок диатомей при небольших параметрах заплеска.

5. ВЫВОДЫ

Ното цунами, проявившееся в бух. Преображения как цунами со льдом, несмотря на небольшую величину волны, оставило протяженный покров ила от края припая к вершине бухты на 325 м (в том числе до 23 м по суше) и по замерзшему руслу водотока до 250 м. Граница максимального заплеска на льду водотока намного превышала зону осадконакопления (на 430 м). Разгрузка материала здесь произошла перед барьером на излучине водотока. Далее выносились только стебли zostеры. В кутовой части бухты линия максимального заплеска лишь на 2–3 м превышала зону с покровом илов.

В осадках преобладают мелкоалевритовые фракции и много пелита, структура мало меняется по простирацию, более тонкий материал осаждался на участке, где стояла вода в центральной части зоны затопления на припаяе, более крупный выносился с льдинами и попадал в удаленную часть зоны заплеска.

Гранулометрический состав и биофоссилии свидетельствуют, что основной источник осадка находился на литорали и сублиторали, где дно активно эродировалось льдинами. Возможно, поступление воды и взвешенного материала происходило по трещинам и в зоне сильно сплоченного ледяного покрова у границы невзломанного припая. Основная масса диатомей представлена эпифитами, которые населяли густые заросли zostеры, сильно пострадавшие при подходе волны. На наиболее удаленной части заплеска на льду водотока происходила дифференциация створок, наиболее мелкие выпали у границы зоны осадконакопления. Количество морских видов снижается по мере продвижения вглубь зоны затопления, пресноводных становится больше. Их источником также были донные илы, в которые они попадали с речным стоком. В составе бентосных фораминифер в мористой части заплеска больше секретионных видов, состав их в цунамигенных илах близок к составу вмерзшегося ила, перенесенного льдинами с верхней сублиторали. Наличие более глубоководных форм свидетельствует, что эрозия дна могла происходить и на глубинах более 5 м.

Несмотря на то, что большая часть покрова цунамигенных илов, залегающих на припаяе, исчезла весной и вряд ли будет сохранен маломощный слой ила в разрезах торфяников, изучение проявления и осадков Ното цунами на континентальном побережье имеет большое значение. Это пример цунами со льдом, опасность которого намного возрастает за счет большой эродирующей

способности волн. Ното цунами показало, что большой риск для замерзающих бухт Южного Восточного Приморья связан с цунами, происходящими в зимний период, в том числе и имеющих очаги в юго-восточной части Японского моря.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.А. Часову, принимавшему участие в исследованиях, и А.М. Лебедеву за определение раковин моллюсков.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы государственного задания ТИГ ДВО РАН 125021302113-3.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Данные по параметрам заплеска цунами могут быть предоставлены по запросу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веркулич С.З., Пушина З.В., Дорожкина М.В. и др. Характеристика природных условий формирования отложений интерстадиала (МИС 3) острова Кинг Джордж (западная Антарктика) на основе изучения ископаемых диатомовых комплексов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4. С. 109–119.
2. Вопросы биогеографии и экологии фораминифер / Отв. ред. чл.-кор. АН БССР А.В. Фурсенко. Новосибирск: Наука, 1973. 224 с.
3. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Нишимура Ю. и др. Проявление палеоцунами в позднем голоцене на побережье бухты Триозерье, Японское море // Успехи современного естествознания. 2016. № 8. С. 166–172.
4. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Нишимура Ю. и др. Осадки исторических и палеоцунами на побережье Восточного Приморья // Тихоокеанская геология. 2015. № 1. С. 79–95.
5. Гусяков В.К., Махинов А.Н. Масштабный природный катаклизм (оползень и цунами) 11 декабря 2018 года в Бурейском водохранилище // Геодинамика, геомеханика и геофизика. Материалы XIX Всероссийской конференции. Новосибирск: ИНГиГ СО РАН, 2019. С. 213–215.
6. Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Проявление цунами Тохoku 11 марта 2011 года на Российском тихоокеанском побережье // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 1. С. 41–64.
7. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Чой Б.Х., Ли Д.С. Сравнительная оценка цунамиопасности Япономорского побережья России на основе численного моделирования // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 179–188.
8. Лоция северо-западного берега Японского моря. 1984. 319 с.
9. Пинегина Т.К. Новые данные об Усть-Камчатском землетрясении 14 апреля 1923 г. по результатам палеосейсмологических исследований // Материалы XXVI ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2023. С. 100–103.
10. Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Оценка сейсмической и цунамиопасности для поселка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 138–159.
11. Полякова А.М. Цунами в Приморье 26 мая 1983 года и его последствия. Владивосток: ТОИ ДВНЦ СССР, 1988. 40 с.
12. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др. Осадки Тохoku цунами 11 марта 2011 года на Южных Курилах: состав и биофоссилии // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 406–418.
13. Растения и животные Японского моря: краткий атлас-определитель. Владивосток: ДВГУ, 2007. 488 с.
14. Рябушко Л.И. Диатомовые водоросли (Bacillariophyta) залива Восток Японского моря. Биота и среда заповедников Дальнего Востока // Biodiversity and Environment of Far East Reserves. 2014. № 2. С. 4–17.
15. 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.
16. Соловьев С.Л., Ферчев М.Д. Сводка данных о цунами в СССР // Бюл. совета по сейсмологии. Проблема цунами. 1961. № 9. С. 23–55.
17. Фораминиферы дальневосточных морей СССР / А.В. Фурсенко, Т.С. Троицкая, Л.К. Левчук и др.; отв. ред. д-р г.-м. наук В.И. Гудина. Новосибирск: Наука, 1979. 398 с.
18. Цой И.Б., Моисеенко И.А. Кремнистые микроводоросли в поверхностных осадках залива Петра Великого и прилегающей части Японской котловины // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 6. С. 180–188.
19. Chiba T., Nishimura Y. Tsunami deposits associated with the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake tsunami in coastal forests near Happon Town, Akita Prefecture, Japan // Earth, Planets and Space. 2022. V. 74. P. 133.
20. Dawson A.G., Shi S. Tsunami deposits // Pure Appl. Geophys. 2000. V. 157. P. 875–897.
21. Dura T., Hemphill-Haley E. Diatoms in tsunami deposits // Geological Records of Tsunamis and Other Extreme Waves. Amsterdam: Elsevier, 2020. P. 291–322.
22. Foraminifera Database. <https://foraminifera.eu/> (дата обращения 03.07.2024 г.)
23. Fujii Y., Satake K. Slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake (M JMA 7.6) estimated from tsunami waveforms and GNSS data // Earth, Planets and Space. 2024. V. 76. P. 44.

24. Goto K., Ishizawa T., Ebina Y. et al. Ten years after the 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunami: Geological and environmental effects and implications for disaster policy changes // *Earth Sci Rev.* 2021. V. 212. P. 103417.
25. Goto T., Satake K., Sugai T. et al. Historical tsunami and storm deposits during the last five centuries on the Sanriku coast // *Japan Marine Geology.* 2015. V. 367. P. 105–117.
26. 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 Geoph.* 2013. V. 170. № 6–8. P. 1103–1114.
27. Krammer K., Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae. Teil 1. Naviculaceae.* Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1986. 876 p.
28. Loeblich Jr. A.R., Tappan H. *Foraminiferal genera and their classification.* Van Nostrand Reinhold, New York, 1988. 869 p.
29. Minoura K., Gusiakov V., Kurbatov A. et al. Tsunami sedimentation associated with the 1923 Kamchatka earthquake // *Sedimentary Geology.* 1996. V. 106. № 1–2. P. 145–154.
30. Murray J.W. *Ecology and Applications of Benthic Foraminifera.* Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 426 p.
31. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A. et al. Coastal sedimentation associated with the Tohoku tsunami of 11 March 2011 in South Kuril Islands, NW Pacific Ocean // *Pure and Applied Geoph.* 2013. V. 170. № 6–8. P. 1081–1102.
32. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A. et al. 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 Applied Geoph.* 2014. V. 171. № 12. P. 3307–3328.
33. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A. et al. Historical tsunami records on Russian Island, the Sea of Japan // *Pure and Applied Geophysics.* 2018. V. 175. № 4. P. 1507–1523.
34. Salaree A., Okal E.A. The “Tsunami Earthquake” of 13 April 1923 in Northern Kamchatka: Seismological and Hydrodynamic Investigations // *Pure and Applied Geoph.* 2018. V. 175. P. 1257–1285.
35. Suppasri A., Kitamura M., Alexander D. et al. The 2024 Noto Peninsula Earthquake: Preliminary observations and lessons to be learned // *International J. of Disaster Risk Reduction.* 2024. V. 110. P. 104611.
36. The historical tsunami database. National Geographical data center.
<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml> (дата обращения 04.07.2024 г.).
37. The World Foraminifera Database.
<https://www.marinespecies.org/foraminifera/> (дата обращения 03.07.2024 г.).

SEDIMENTOLOGICAL EFFECT OF NOTO TSUNAMI IN THE CONDITIONS OF ICE COVER ON THE COAST OF THE JAPAN SEA

N. G. Razjigaeva^{a, *}, D. G. Tyunyatkin^a, L. A. Ganzey^a, T. A. Grebennikova^a,
E. D. Ivanova^a, Yu. P. Putintsev^a, Yu. Yu. Zhabyko^b, D. R. Shpachuk^{a, c},
E. I. Stasyuk^c

^a Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

^b “Primorskoe UGMS”, Vladivostok, Russia

^c Far East Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia

* e-mail: nadyar@tigdvo.ru

The Noto tsunami inundation zone was surveyed in the field in Preobrazheniye Bay (Eastern Primorye) in late January and April 2024. Before the tsunami, the inner part of the bay began to freeze, forming fast ice and drift ice. Despite the low wave height and run-up (20–60 cm according to the results of tacheometric survey), an extensive silt-pelitic mud sheet was formed in the bay on unbroken fast ice and strongly consolidated ice, and covered the shore in the head of the bay (from 1.5 to 26 m). The total length of the silt sheet was 325 m. The tsunami penetrated along the frozen stream up to 680 m from the mouth, and the mud sheet and patches were encountered up to 250 m. Features of wave propagation were recorded by the position of grass blades, *Zostera* rollers and algal scraps. The grain size composition of mud and biofossils (diatoms and benthic foraminifera) were studied. Changes in grain size and ecological groups of biofossils along the profiles were analyzed. Epi-phytes predominate among the diatoms. Benthic foraminifera are mainly represented by agglutinating forms. The source of the material was the littoral and sublittoral, where active erosion of bottom sediments by water saturated with ice floes took place. The implications of the results for paleotsunami searches are discussed.

Keywords: tsunami run-up, sedimentation, erosion, tsunami mud, grain size, diatoms, benthic foraminifera, Preobrazheniye Bay, southern Far East