

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

Том II

**ГЕОЛОГИЯ УРАНА,
ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ**

Москва
2011

УДК 504.0
ББК 26.2
Г35

Экстремальные природные явления и катастрофы : в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико;
ИФЗ РАН. – М. : ИФЗ РАН, 2010; 2011.

ISBN 978-5-91682-012-6

Г35 Т. 2 : **Геология урана, геэкология, гляциология** / Отв. ред. В.М. Котляков, ИГ РАН;
отв. сост. А.Л. Собисевич, ИФЗ РАН; – М. : ИФЗ РАН, 2011.

ISBN 978-5-91682-014-0

Во втором томе коллективной монографии изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, связанных с изучением актуальных проблем современной геологии урановых месторождений, геэкологии и гляциологии, имеющих целью обеспечение безопасности населения и важных промышленных объектов на территории Российской Федерации. Анализируются основные промышленно-генетические типы урановых месторождений; рассмотрены новые прогрессивные технологии добычи радиоактивных материалов; изучено поведение актинидов в условиях долгосрочного хранения и захоронения отработанного ядерного топлива. Полученные научные результаты отражают современные проблемы безопасности атомной энергетики.

Приведены новые научные данные, связанные с изучением эволюции Антарктического и арктических ледниковых покровов, от состояния которых зависит уровень Мирового океана. Достаточно внимания уделено геэкологическим проблемам Северного Кавказа. Анализируются уникальные данные, полученные при проведении глубокого кернового бурения ледника на Западном плато вулканической постройки Эльбруса.

Изучены наиболее опасные геэкологические процессы на территории РФ, которые могут привести к гибели людей, ранениям и потере здоровья, а также к значительным материальным ущербам; разработан специальный ГИС-проект, который является готовым к использованию продуктом со всеми элементами, присущими автоматизированной информационной системе специального назначения, содержащей развернутые базы данных.

Полученные новые научные результаты и разработанные технологии уже востребованы на практике.

Для специалистов в области наук о Земле, строительства и чрезвычайных ситуаций.

УДК 504.0
ББК 26.2

The Volume II of the collective monograph presents the results of both theoretical and experimental studies of actual problems of modern geology of uranium deposits, geoecology and glaciology in order to mitigate issues on public safety and potentially hazardous industrial facilities and consequent risks on the territory of Russian Federation. Primary types of industrial uranium ore deposits are analysed, new progressive technologies of prospecting of radioactive materials are considered, the behaviour of actinides in long-time storages and nuclear waste burial sites are studied. The results obtained represent modern safety problems of nuclear power engineering.

New scientific data related to evolution of glaciers in Arctic and Antarctica governing the global level of world ocean are presented. Specific attention is paid to geoecological problems in Northern Caucasus. Genuine data gathered in the course of deep core drilling on the Western plateau of the Elbrus volcano.

Most significant hazardous geoecological processes on the territory of Russian Federation, threatening populated areas in terms of human health and injury, substantial property damage are studied. The specialized geographical information system (GIS) is the database driven product with high level of automation and it has been developed in frames of the actual research initiative.

The new fundamental scientific results obtained and the new technologies developed are of particular interest for practical applications.

The book will satisfy the needs of specialists in Earth sciences, industrial construction applications and hazard assessment.

ISBN 978-5-91682-014-0
ISBN 978-5-91682-012-6

© Российская академия наук, 2011
© Коллектив авторов, 2011

Б.В. Левин¹, Г.В. Шевченко¹, В.М. Кайстренко¹,
Т.Н. Ивельская², Т.К. Пинегина³, Н.Г. Разжигаева⁴

ПРОБЛЕМА ЦУНАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ АСПЕКТ)

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

² Сахалинское управление Росгидромета, Центр цунами

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

⁴ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению цунами резко возрос в начале XXI в. после одной из самых страшных по своим последствиям природных катастроф – землетрясения и цунами в Юго-Восточной Азии 26 декабря 2004 г. Накопленные к этому времени знания о природе этого опаснейшего явления подробно изложены в известных монографиях [Левин, Носов, 2005; Levin, Nosov, 2009; Bernard, Robinson, 2009]. В данной работе представлены наиболее яркие достижения дальневосточных исследователей за последнее десятилетие в изучении цунами и разработке мер по снижению риска от их воздействия на прибрежные населенные пункты.

Особо следует отметить оправдавшийся прогноз и последовавший детальный анализ геодинамических условий возникновения недавних сильнейших цунами 2006–2007 гг. в районе Средних Курильских островов. выполненный коллектива авторов под руководством Н.П. Лаверова [Лаверов и др., 2006б, 2009].

Цунами относится к числу самых грозных явлений природы, которое наносит большой ущерб хозяйственным объектам прибрежных населенных пунктов, а иногда приводит и к человеческим жертвам. Катастрофическое событие, произошедшее 26 декабря 2004 г. в Юго-Восточной Азии и унесшее более 230 тыс. человеческих жизней, по своим последствиям относится к числу самых тяжелых в мировой истории. Оно имело огромный резонанс, и во всех странах, на побережье которых наблюдаются волны цунами, заставило пересмотреть отношение к изучению этого явления и мерам по снижению риска от его воздействия. В полной мере это относится и к России, так как волны цунами представляют серьезную угрозу всему тихоокеанскому побережью, но особенно грозную – для Курильских островов и Камчатки.

Термин «циунами» имеет японское происхождение и означает «большая волна в гавани». Цунами представляет собой длинную волну (чаще цуг, или группу таких волн), которая вызывается движениями дна океана в области сильного подводного землетрясения. Гораздо реже это явление бывает связано с эксплозивными извержениями вулканов или оползнями, но эти виды источников не играют существенной роли для дальневосточного побережья России, и в данной работе не рассматриваются.

Курильская островная дуга и п-ов Камчатка находятся вблизи одной из самых сейсмоактивных областей в мире, приуроченной к западному склону Курило-Камчатского глубоководного желоба, именно здесь расположены и очаги исторических цунамигенных землетрясений.

Очаги цунамигенных землетрясений в данном районе распределены крайне неравномерно. На Северных Курилах за исторический период отмечено четыре таких события, два из которых, произошедших 17 октября 1737 г. и 4 ноября 1952 г., относились к числу самых грозных. Последнее по тяжести последствий и количеству жертв не имеет себе равных на тихоокеанском побережье России. На Средних Курилах таких землетрясений отмечено всего три, причем два из них произошли недавно, в 2006 и 2007 гг. Цунами 15 ноября 2006 г. также следует относить к числу особо опасных, хотя волны высотой 12–20 м обрушились на безлюдные берега островов Симушир, Кетой, Матуа и др. [Левин и др., 2008]. Для сравнения, в районе Южных Курильских островов зафиксировано около 20 цунамигенных землетрясений, хотя интенсивность цунами была несколько ниже, чем при экстремальных событиях в центральной и северной частях гряды. Но и здесь были отмечены значительные цунами, принесшие значительный материальный ущерб прибрежным населенным пунктам. Последнее из них произошло 4 октября 1994 г. и вызвало значи-

тельные разрушения объектов береговой инфраструктуры, главным образом в Южно-Курильске и Мало-курильском.

ПРОЯВЛЕНИЯ ЦУНАМИ НА КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВАХ

Камчатское цунами 5 ноября 1952 г. В этот день у дальневосточных берегов России произошло цунами, вызвавшее самые катастрофические последствия в данном регионе. Только на Северных Курильских островах погибли 2336 человек гражданского населения (потери среди военных до сих пор засекречены). Практически все поселки на побережье Южной Камчатки и Северных Курильских островов были уничтожены волнами высотой до 20 м. В Северо-Курильске, самом крупном населенном пункте в атакованном цунами районе, было смыто 95 % строений. Схема затопления города представлена на рис. 1, фотография разрушений – на рис. 2. Столь большие разрушения и потери были, с одной стороны, объективным следствием редкого по своей интенсивности цунами, вы-

званного сильнейшим землетрясением с магнитудой $M_w = 9,0$, а с другой стороны – полной неготовностью населения, не знакомого с особенностями проживания в цунамиопасном районе. Люди, заселившие эти острова после их возвращения России, прибыли в основном из Европейской части страны и никогда не слышали о таком явлении, как цунами.

Цунами 1952 г. было трансокеаническим, сопровождавшимся волнами опасной высоты практически по всему Тихому океану: до 4 м в Японии, до 6 м на Гавайских островах, до 3 м на побережье Чили.

Благодаря оперативности командира Камчатской флотилии адмирала Г. Холостякова и начальника Второй Гидрографической экспедиции И.П. Кучерова было проведено обследование атакованного цунами района по свежим следам. Отчет Гидрографической экспедиции и последующая публикация группы исследователей Института физики Земли являются наиболее полными сводками данных о проявлениях этого цунами.

Организационные меры, предпринятые руководством страны, были адекватными и оперативными: к 1958–1959 гг. была создана служба предупреждения о цунами, местными администрациями были разработаны планы эвакуации жителей в специально от-

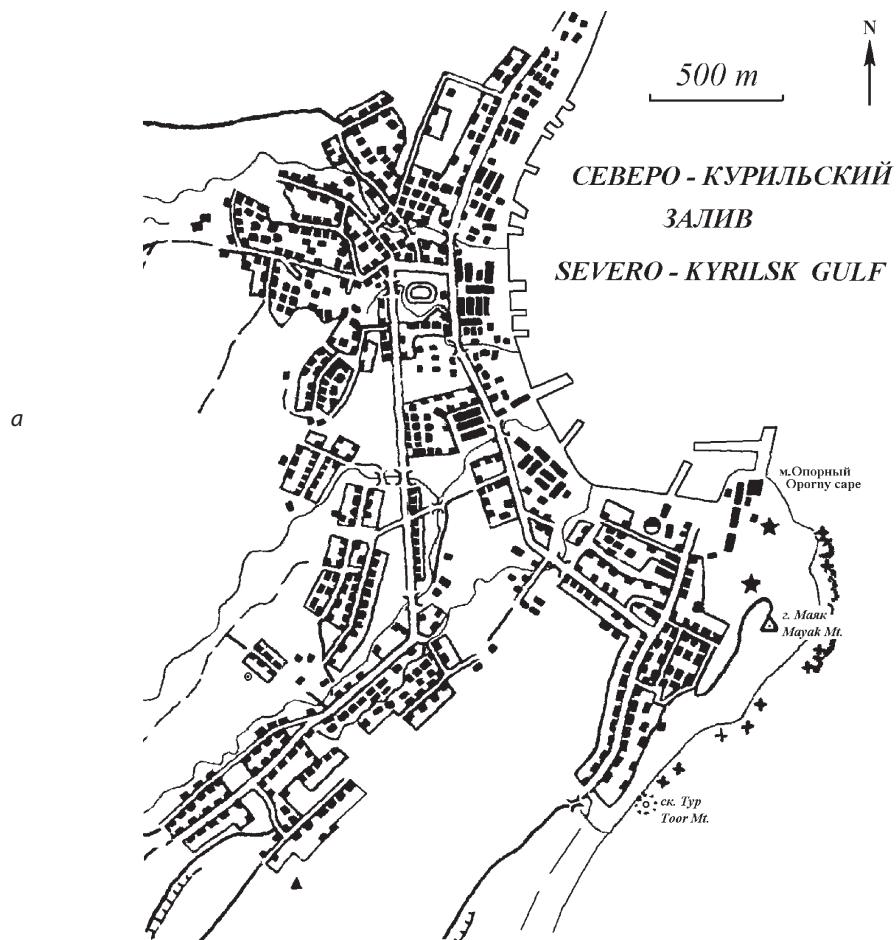


Рис. 1. Карта г. Северо-Курильск перед цунами 5 ноября 1952 г. (а) и зона затопления города (б) [Kaistrenko, Sedaeva, 2001] (начало)

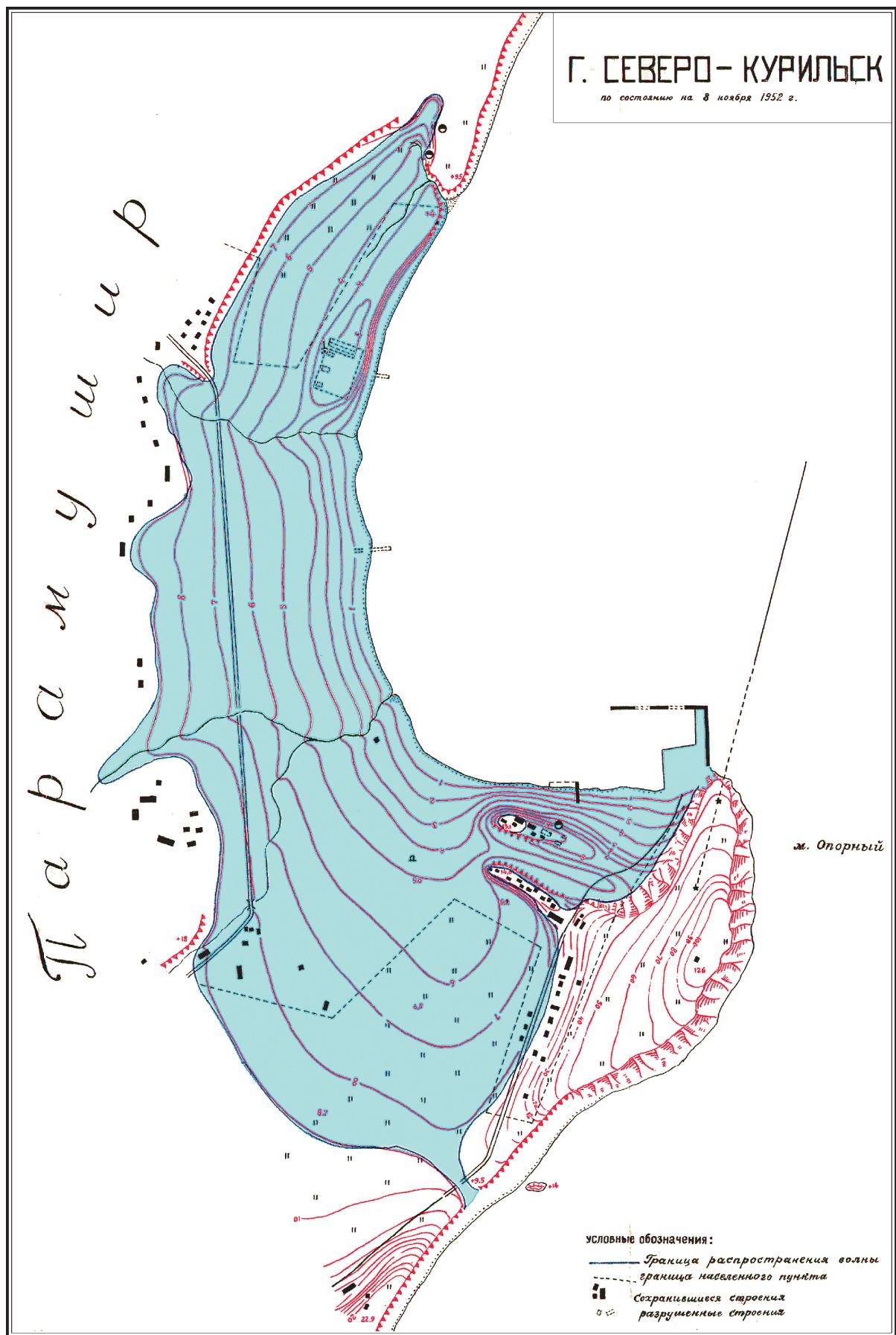


Рис. 1. (окончание)



Рис. 2. Последствия цунами 5 ноября 1952 г. в Северо-Курильске [Kaistrenko, Sedaeva, 2001]

веденные места, начала проводиться просветительская работа среди населения.

Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. В этот день в районе Южных Курильских о-вов произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_w = 8,3$, которое вызвало значительные волны цунами на побережье Южных Курил; заметные волны зарегистрированы на Сахалине и во многих пунктах на побережье Тихого океана (в Японии, США, Чили и других странах) (рис. 3). К счастью, человеческих жертв от цунами не было, поскольку оно произошло в ночные часы, однако причиненный им материальный ущерб оказался значительным. Прежде всего, это относится к пос. Южно-Курильск, в южной части которого зона затопления имела ширину 140–150 м, а вдоль р. Серебряная волны цунами проникли на 880 м от уреза воды. Большинство зданий, попавших в эту зону, получили серьезные повреждения, некоторые были сорваны с фундаментов и перенесены волнами от обычного места положения [Королев и др., 1997]. Получили повреждения и рыболовецкие суда, которые не успели отойти в открытое море.

В бухте Малокурильская на о. Шикотан волны высотой 1,9–3,4 м также затронули объекты, находившиеся в прибрежной зоне. В удаленной от горловины, низменной части бухты ширина зоны затопления достигла 70 м, а вдоль ручьев волны цунами проникли значительно дальше [Кайстренко и др., 1997]. В бухте Крабовая, удаленная часть которой отличается малыми уклонами рельефа, ширина зоны затопления составила 300–500 м. Были затоплены ряд домов на улицах Западная и Торговая пос. Крабозаводское, из которых за год до этого события жители были отселены.

Максимальные высоты волн на тихоокеанском побережье о. Шикотан, обращенном к источнику цунами, составляли 5–8 м, самый большой заплеск около 15 м был отмечен в бухте Церковная [Кайстренко и др., 1997]. На западном берегу острова, а также на восточном побережье о. Кунашир высоты волн составляли преимущественно 3–4 м (рис. 3). Исключение составляет участок к северу от пос. Южно-Курильск, где на не прикрытом о. Шикотан волны достигали высоты 8 м.

Симуширское цунами 15 ноября 2006 г. В этот день в центральном сегменте Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой $M_w = 8,1$. Его очаг располагался в океане напротив островов Симушир – Матуа, а эпицентр находился примерно в 85 км от северной оконечности о. Симушир. Землетрясение такой силы было зафиксировано в этом районе впервые за всю историю сейсмических наблюдений и было началом серии землетрясений, заполнивших так называемую «сейсмическую брешь», на существовании которой было основано предсказание сильного цунами в данном районе [Лаверов и др., 2006а]. Образование гигантских волн, обрушившихся, по счастью, на совершенно безлюдные острова, способствовала малая глубина очага землетрясения, составлявшая всего 10–12 км.

Две экспедиции, проведенные в период с 1 июля по 14 августа 2007 г. на островах Уруп, Симушир, Кетой, Янкича и Рыпонкича (о-ва группы Ушишир), Расшуа, Матуа, позволили измерить высоту и дальность заплесков цунами, собрать данные по геологическим эффектам землетрясения и цунами на побережьях. Самые высокие заплески были выявлены

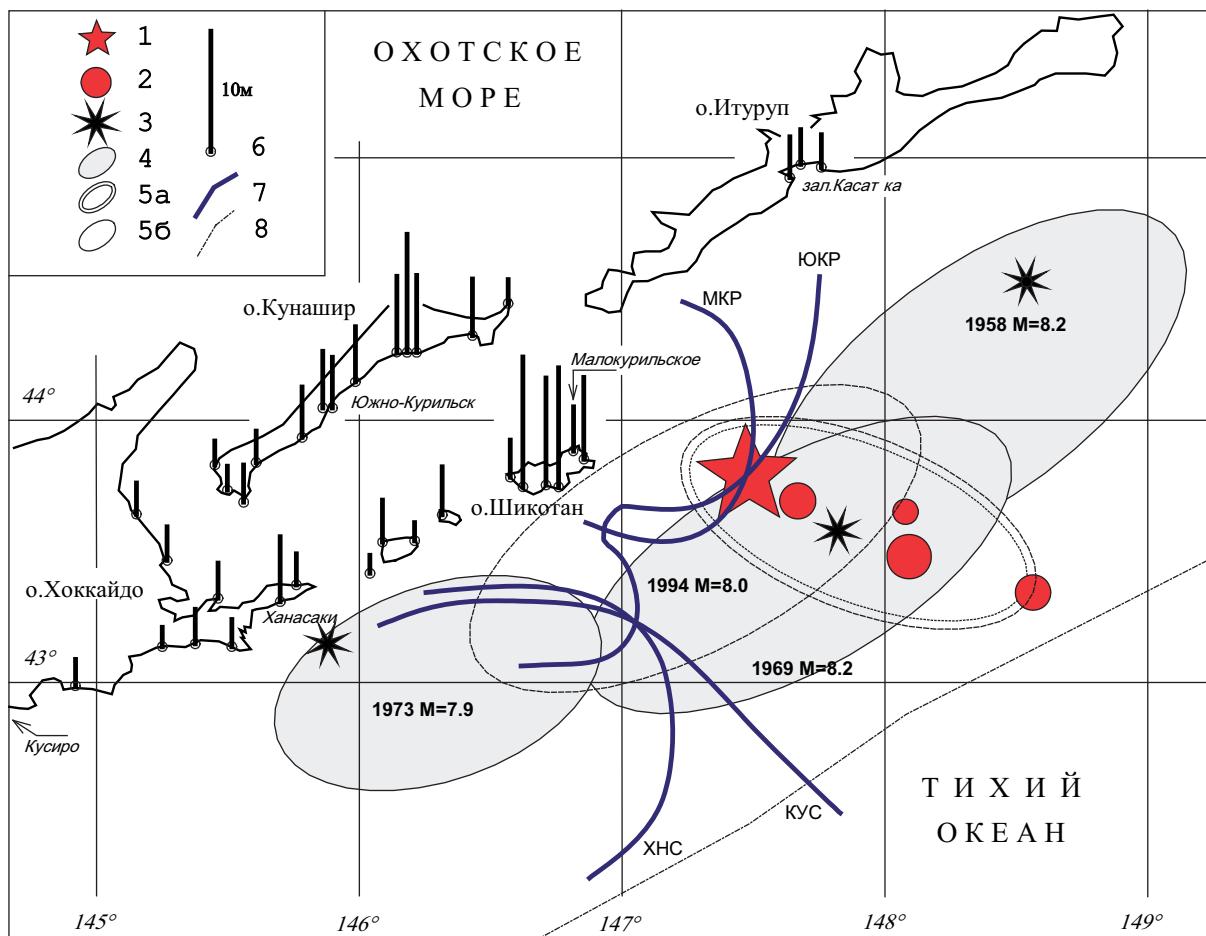


Рис. 3. Область очага Шикотанского цунами 5 октября 1994 г. и максимальные наблюденные высоты цунами на побережье (по результатам полевого обследования).

1–3 – эпицентры: 1 – главного толчка, 2 – афтершоков с $M_i \geq 6,8$ в первые 6 часов после главного толчка, 3 – сильнейших исторических землетрясений (указаны год и магнитуда землетрясения); 4–5 – контуры очагов цунами [Иващенко и др., 1996]

на о. Матуа, где их средняя высота превышала 10 м. В бухте Айну (юго-запад о. Матуа) цунами сильно изменило морфологию берега, размыв участок морской аккумулятивной террасы шириной 20–30 м. В бухте Душной (северо-восточная часть о. Симушир) цунами оставило на морской террасе многочисленные промоины высотой более 10 м. Помимо эрозии, на обследованных побережьях повсеместно наблюдалась и аккумуляция. Отложения цунами представлены морским песком, галькой, валунами, перемещенным в сторону суши плавником. На крутых склонах берегов во время цунами была частично уничтожена растительность и смыта почва. Данные по высотам и дальностям заплеска цунами представлены на рис. 4 и в таблице.

Чилийское цунами 24 мая 1960 г. 23 мая в 6 часов 15 минут по сахалинскому времени в Тихом океане, у берегов Чили произошло самое сильное в XX в. землетрясение с магнитудой $M_w = 9,5$, вызвавшее образование мощного трансокеанического цунами. Цунами у берегов СССР, вызванное таким далеким землетрясением, наблюдалось впервые. Об исключи-

тельности явления говорит тот факт, что колебания уровня наблюдались у берегов Сахалина и у северного побережья Охотского моря, где раньше волны цунами не регистрировались и при гораздо более близких землетрясениях. В бухте Нагаево отмечалось пять ярко выраженных волн, максимальная высота которых (от подошвы до гребня, по метеограмме) достигала 220 см.

В Северо-Курильске цунами началось с резкого падения уровня, которое было замечено дежурным портнадзора в 4 часа 45 минут по сахалинскому времени. На основании этого сообщения была объявлена тревога цунами – население поднялось на сопки, а флот был выведен в открытое море. Хотя повышение уровня носило скорее характер подтопления, волной цунами был причинен серьезный ущерб. Все склады и жилые помещения города, расположенные ниже отметки 4,7 м, были затоплены. В порту смыло значительное количество соли, угля, лесоматериалов, вышла из строя энергетическая система и т. д.

Цунами 24 мая характерно тем, что высоты волн имели примерно одинаковый порядок как в бухтах,

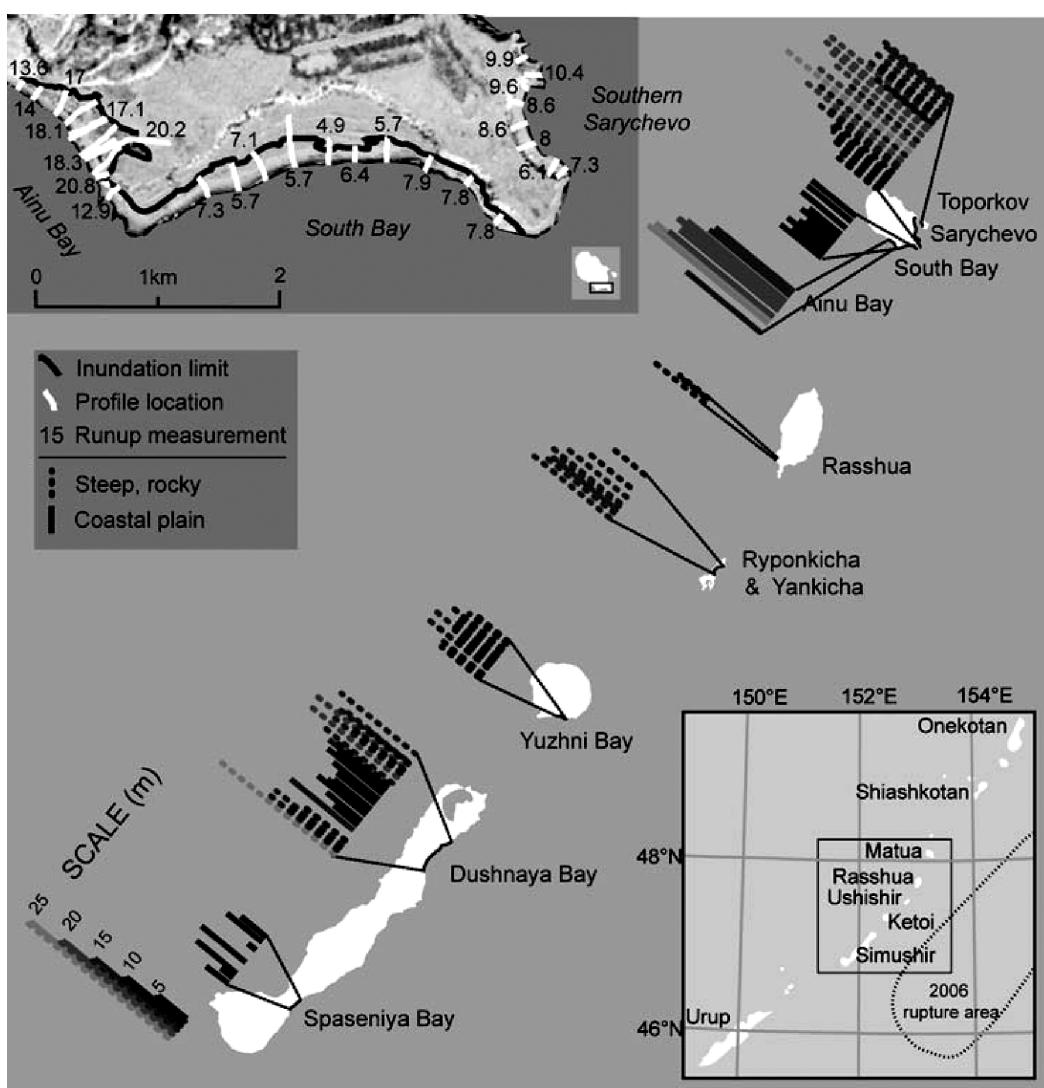


Рис. 4. Распределение заплесков цунами 15 ноября 2006 г. на побережье Центральных Курильских островов [MacInnes *et al.*, 2009а, б]

Таблица. Данные по максимальным и средним заплескам цунами 15 ноября 2006 г. на побережье Центральных Курильских островов [MacInnes *et al.*, 2009а, б]

Остров	Участок берега	Тип берега	Средняя высота заплеска, м	Средняя длина заплеска, м	Максимальный заплеск, м
Симушир	бухта Спасения	плоский, широкий	4,9	111	7,2
Симушир	бухта Душная	плоский, широкий	8,1	121	
Симушир	бухта Душная	короткий, крутой	12,6	65	20
Кетой	залив Южный	короткий, крутой	7,5	39	10,6
Ушишир	Янкича и Рыпонкича	короткий, крутой	10,4	49	13,6
Расшуа	ЮЗ берег	короткий, крутой	6,2	61	9,4
Матуа	Сарычева, южная	плоский, широкий	9,2	108	
Матуа	Сарычева, север	короткий, крутой	13,4	57	21,9
Матуа	бухта Южная	плоский, широкий	6,6	152	7,9
Матуа	бухта Айну	плоский, широкий	17,0	268	20,8
Матуа	Топорков	короткий, крутой	9,8	35	11,3

так и у открытого побережья. Волны такой же высоты, как и в Северо-Курильске (около 5 м по визуальным данным), наблюдались на гидрометеостанциях мыс Васильева и Шумшу. На Южных Курильских островах высоты волн также были значительными, по наблюдениям на станциях Буревестник, Малокурильское, Южно-Курильск и Зеленовск они составляли 3–4 м.

Все станции отмечали спокойный характер явления – сравнительно медленное понижение и повышение уровня и сильные течения, наблюдавшиеся в ряде бухт.

Огромные пространственные масштабы цунами 24 мая привели к тому, что волны наблюдались одновременно у всего тихоокеанского побережья СССР. Обычно цунами не проникали в Охотское море через проливы Курильской гряды, а если и проникали, то не могли вызвать значительных колебаний уровня. На этот раз, охватив все Курильское побережье, цунами проникло в Охотское море и вызвало там сильные колебания уровня. Цунами 24 мая обошлось без человеческих жертв, но принесло значительный материальный ущерб, составивший по Сахалинской области около 30 млн рублей.

Приведенные примеры показывают, что в различных районах Курильской островной гряды происходили сильные цунамигенные землетрясения, а вызванные ими волны привели к человеческим жертвам и нанесли серьезный материальный ущерб прибрежным населенным пунктам. Исключение составило Симуширское цунами 15 ноября 2006 г., максимальное проявление которого пришлось на острова, на которых в настоящее время постоянное население отсутствует. Пример Чилийского цунами 24 мая 1960 г. продемонстрировал, что и удаленные землетрясения большой силы также могут представлять серьезную опасность для тихоокеанского побережья России.

СЛУЖБА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ

По повторяемости сильных цунамигенных землетрясений материковый склон у Южных Курильских островов относится к числу самых цунамиактивных районов в мире. По этой причине изучению цунами и мерам по снижению ущерба от них уделяется большое внимание. Эти меры разделяются на две категории – оперативного (Служба предупреждения населения о волнах цунами) и долгосрочного характера, к которым относится количественная оценка цунамиопасности и создание карт возможных высот цунами редкой повторяемости, которые рассмотрим позже.

После разрушительного цунами 1952 г. на Дальнем Востоке России была создана Служба предупреждения о цунами. Советом министров СССР в 1956 г. принимается постановление об организации своевременного оповещения населения Дальнего Востока о цунами. Создание

Службы предупреждения о цунами (СПЦ) в основном завершилось к 1958–1959 гг. Возможность возникновения цунами в результате землетрясения оценивается по магнитудно-географическому критерию. Землетрясение считается цунамиопасным, если его эпицентр попадает в цунамигенную зону, а интенсивность превышает заданное пороговое значение магнитуды. Этот принцип, сформулированный академиком С.Л. Соловьевым около 50 лет назад, и сейчас играет ключевую роль в деятельности СПЦ. Для землетрясений в Курило-Камчатской цунамигенной зоне М пороговое равно 7,0. В этом случае сообщение об угрозе цунами немедленно передается по схеме оповещения населению, предприятиям и организациям, расположенным в прибрежной зоне, а также судам в море, у причалов и на рейде.

Впервые тревога цунами на Южных Курильских островах была объявлена при сильном ($M = 8,2$) землетрясении 7 ноября 1958 г., очаг которого находился на материковом склоне в 170–200 км к востоку от о. Итуруп. Специалисты сахалинской СПЦ еще не имели опыта определения угрозы возникновения цунами, а на Курильских островах к тому времени не работала ни одна сейсмостанция (хорошо оборудованная станция в Курильске была закрыта на ремонт), не надежны были и каналы связи. Важную роль сыграла телеграмма Японского метеорологического агентства, сообщившая об угрозе цунами для тихоокеанского побережья Японии. На эту телеграмму оперативно отреагировали дежурные специалисты управления гидрометеослужбы и тревога была объявлена для Южно-Курильского района за 15–18 минут до подхода цунами. Основная часть населения и больные из больницы были организованно эвакуированы в безопасные места, установлена охрана квартир, складов и учреждений. Хотя по своей силе землетрясение было близким к Камчатскому 1952 г., волны цунами были значительно меньше ожидаемых – на океанском побережье островов Шикотан и Итуруп максимальные заплески не достигали 4–5 м.

Недостаточная точность определения цунами на основе сейсмологической информации служит причиной значительного числа ложных тревог, что существенно осложняет деятельность СПЦ и приводит к экономическому ущербу при отсутствии цунами. Так, за период с 1958 по 1994 г. тревога цунами объявлялась 51 раз, из которых оправданным прогноз был только в 19 случаях, что составляет 37 % [Поплавский и др., 1997]. За весь период существования службы по 2010 г. включительно тревога объявлялась 79 раз, из них ложных было 57, таким образом, оправдываемость снизилась до 28 %. Примерно на таком же уровне находились показатели эффективности прогноза, основанного на сейсмологических данных, и в большинстве зарубежных СПЦ. Определенную роль в снижении числа ложных тревог сыграли попытки детализации магнитудно-географического критерия [Золотухин, Ивельская, 2010].

Серия вычислительных экспериментов с разным положением источников цунами и магнитудами в ди-

пазоне от 7 до 8 показала, что для района, прилегающего к центральной части Курильской гряды, можно повысить магнитудный порог с единого значения 7 до 7,5. Введение этого правила позволило избежать большого числа ложных тревог при серии землетрясений, последовавших за мощным событием 15 ноября 2006 г. Только одно из этих землетрясений, с магнитудой $M = 8,3$, имевшее место 13 января 2007 г., вызвало заметное цунами. Однако основной прогресс, как в международной, так и в отечественной службе цунами связан с развитием сети телеметрических регистраторов цунами, прежде всего глубоководных буйковых станций DART. Информация о параметрах цунами в открытом океане во многих случаях позволяет заблаговременно определить ожидаемые высоты волн на защищаемых участках побережья, оценить степень угрозы и более обосновано принимать решение о подаче (или не подаче) тревожного сообщения. При удаленном источнике обычно имеется достаточный запас времени, чтобы использовать данные глубоководных уровенных станций в численных расчетах распространения цунами, что позволяет получить еще более точные оценки ожидаемых высот волн на берегу.

Наличие цифровых записей цунами в открытом океане, не искаженных влиянием мелководных эффектов, помимо задач раннего обнаружения цунами в целях предупреждения, послужило мощным толчком для развития представлений о физике этого опасного природного явления.

До недавнего времени службу цунами на территории Сахалинской области несли всего две сейсмические станции «Южно-Сахалинск» и «Северо-Курильск», входящие в систему наблюдений Геофизической службы РАН и оснащенные устаревшим специальным аналоговым оборудованием. Основной недостаток – решение об опасности возникновения цунами от возникшего землетрясения принималось каждой сейсмической станцией автономно, обработка данных по сети станций не проводилась. А регистрация уровня моря и передача данных в Центр цунами выполнялась одной станцией, в Северо-Курильске.

В 2006 г. для обеспечения своевременного, надежного и достоверного предупреждения населения, хозяйственных объектов об угрозе цунами постановлением Правительства РФ была утверждена федеральная целевая программа (ФЦП) «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 г.». В результате выполнения в 2006–2010 гг. мероприятий федеральной программы организована опорная широкополосная цифровая сейсмическая станция (ОШЦСС) службы предупреждения о цунами (СПЦ) «Южно-Сахалинск», которая состоит из центральной станции и четырех выносных пунктов на удалении от 30 до 70 км от нее. Установлены цифровые станции в Северо-Курильске, Курильске, Южно-Курильске и Малокурильском.

Введены в постоянную эксплуатацию центр сбора и обработки данных в г. Южно-Сахалинск (Центр

цунами) и система инструментальных наблюдений за уровнем моря в составе автоматизированных постов «Корсаков», «Северо-Курильск», «Холмск», «Стародубское», «Поронайск», «Крильон», «Малокурильское», «Курильск», «Южно-Курильск» и «Невельск; в Приморском крае «Находка», «Владивосток», «Рудная Пристань», «Сосуново»; в Камчатском крае «Водопадная», «Никольское», «Петропавловск-Камчатский», «Осора» и «Семячик».

Развитие сети телеметрических регистраторов на дальневосточном побережье России представляет собой крупный шаг в развитии системы предупреждения о волнах цунами, способствующий снижению риска и смягчению последствий этого катастрофического природного явления. Оперативная информация о развитии волнового процесса в защищаемом регионе позволяет более обосновано подавать сигнал о тревоге цунами и об ее отбое.

В феврале 2010 г. Служба предупреждения о цунами прошла серьезную проверку. Произошло сильнейшее землетрясение у берегов Чили. Впервые в истории этой службы в режиме реального времени поступали данные о характере колебаний уровня моря в различных пунктах Дальневосточного региона, что позволило принимать четкие и взвешенные решения на основе объективной информации. Это прибрежные станции, и хотя записи цунами на них невозможно эффективно использовать для прогноза цунами, они важны для определения времени подачи сигнала об отбое тревоги цунами. Тем не менее, возможность следить за развитием ситуации в защищаемом регионе оказала большую помощь сахалинской СПЦ, когда волны цунами, зародившиеся у берегов Чили, достигли Курильских островов. Была объявлена тревога цунами, находящимся в портах судам была дана команда выйти в открытое море, а населению – подняться на возвышенность. Эти меры были оправданы: как на Северных, так и на Южных Курилах высоты волн были около 2 м. Цунами такой интенсивности не представляет угрозы для объектов береговой инфраструктуры, но может быть опасно для оставшихся вблизи берега судов и находящихся в прибрежной зоне людей.

В ноябре 2010 г. на материковом склоне Южных Курил, юго-восточнее о. Итуруп была установлена первая в истории отечественной Служба предупреждения о цунами глубоководная станция, что позволяет рассчитывать на существенное повышение эффективности службы.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦУНАМИ ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Инструментальные измерения колебаний уровня моря дают наиболее надежную информацию о характеристиках цунами – моментах прихода и высотах пер-

вой и максимальной волн, преобладающих периодах и длительности колебаний. Тщательный анализ записей цунами позволяет, с одной стороны, изучать особенности генерации волн в зоне подводного землетрясения, а с другой – влияние донного рельефа и топографии береговой черты в районе измерений, которое во многих случаях приводит к резкому усилению волн на определенных резонансных частотах.

До недавнего времени основным источником таких данных были записи береговых самописцев уровня моря. Центр цунами СахУГМС совместно с ИМГиГ ДВО РАН предприняли усилия по созданию цифрового архива записей цунами на Дальневосточном побережье России, для создания которого было оцифровано около 300 лент. Оцифрованные записи обрабатывались по единой схеме – сначала приводились к дискретности 1 минута, а затем из них вычитался предвычислений прилив.

Один из самых интересных результатов, полученных при анализе этих материалов, связан с особенностями проявления упомянутого выше Чилийского цунами 24 мая 1960 г. [Ивельская, Шевченко, 2006]. Полученные ряды непериодических колебаний уровня при Чилийском цунами на станциях России и Японии (рис. 5) представлены на рис. 6.

Размах колебаний в Южно-Курильске составлял около 2 м; в начальный период, когда наблюдались волны наибольшей высоты, преобладала низкочастотная составляющая. Можно предположить, что положение станции внутри Южно-Курильского пролива, из-за ослабляющего влияния Малой Курильской гряды, привело к заметному уменьшению интенсивности цунами по сравнению с тихоокеанским побережьем. Об этом свидетельствует и тот факт, что на расположенной на сравнительно небольшом удалении, но на открытом побережье о. Хоккайдо станции Ханасаки, размах колебаний превысил 3 м, при этом общая структура записи имеет много общего с таковой на российской станции.

На самой северной станции о. Хонсю, Хачинохе, наблюдались наибольшие высоты волн – размах колебаний здесь достигал 5 м. Так же как и в двух рассмотренных выше случаях, в начальный момент (когда интенсивность цунами была максимальной) преобладали низкочастотные колебания. Однако на сравнительно небольшом удалении к югу, на станции Мияко интенсивность цунами резко уменьшается – здесь размах колебаний даже меньше, чем на закрытой Малой Курильской грядой станции Южно-Курильск. При этом и частотная структура сигнала значительно отличается от рассмотренных выше случаев – здесь отсутствуют низкочастотные вариации в начальном отрезке записи. Сходная структура записи, с несколько большими высотами волн на начальном отрезке, наблюдалась на расположенной на небольшом расстоянии к югу станции Камаиси. По мере удаления от данных пунктов на юг характер волнового процесса становится более близким к наблюдавшемуся на станциях Хоккайдо и северной

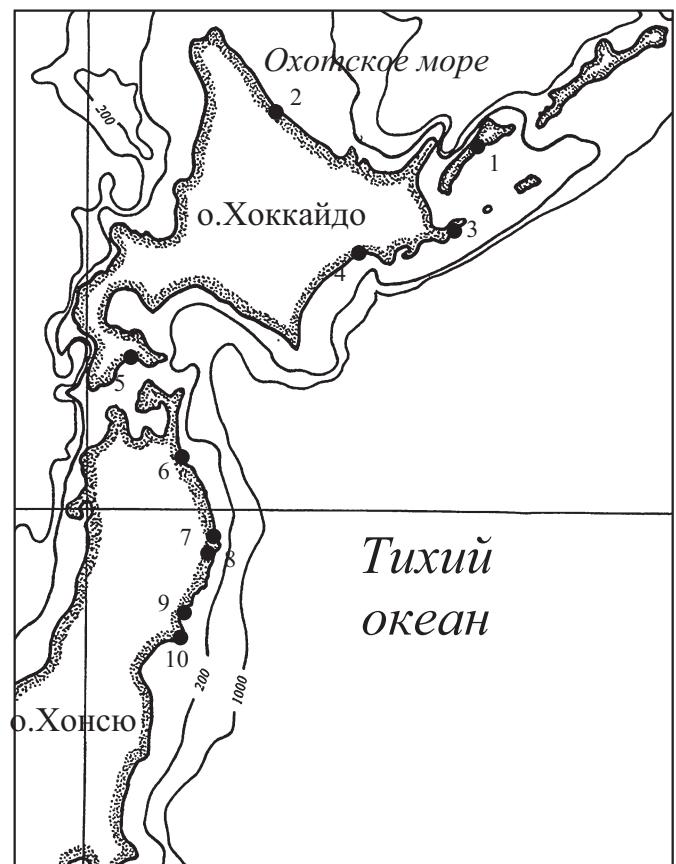


Рис. 5. Карта северо-западной части Тихого океана. Показано положение метеорологических станций, записи на которых были оцифрованы и использовались при анализе Чилийского цунами – Южно-Курильск (1), Момбецу (2), Ханасаки (3), Кусиро (4), Хакодате (5). Хачинохе (6), Мияко (7), Камаиси (8), Накаминато (9), Чоши (10)

части о. Хонсю – на начальном отрезке записи проявляются низкочастотные колебания, и высоты цунами заметно возрастают.

Такой характер распределения периодов и высот волн вдоль побережья Японии обусловлен влиянием прибрежного рельефа, а именно шельфового резонанса. Ранее И.В. Файн [1984] на основе численных расчетов показал, что в северной и южной частях Курильской гряды, где шельф достаточно мелководный и протяженный, данный эффект ярко выражен, причем наибольшие значения коэффициента усиления амплитуды волн (в 5–6 раз) приходятся на периоды 80–90 мин. В центральной части гряды, где шельф короткий и приглубый, шельфовый резонанс выражен слабо, наблюдается провал частотной характеристики. Отметим, что в приведенном выше описании Чилийского цунами на Северных и Южных Курилах подчеркивались необычно медленные, плавные изменения уровня.

Аналогичная ситуация была выявлена и на побережье Японии. На участках с протяженным мелководным шельфом (Ханасаки, Хачинохе, Накаминато)

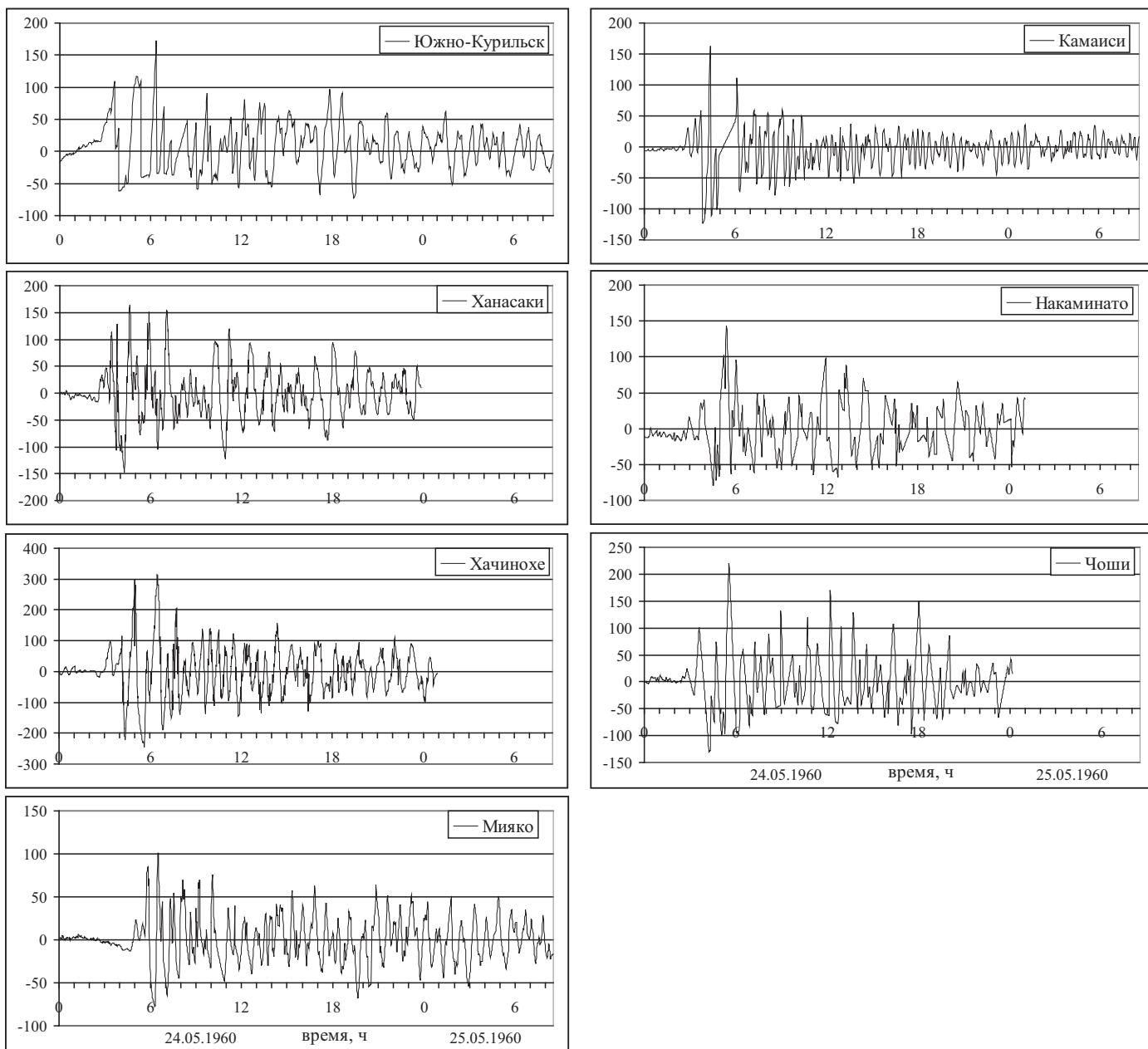


Рис. 6. Записи Чилийского цунами 1960 г. в северо-западной части Тихого океана (вычен предвычисленный прилив). По горизонтальной оси отложено время в часах

отмечены мощные волны с периодами 80–90 мин, вызвавшие значительные разрушения в прибрежных населенных пунктах, а в районе его сужения (Мияко, Камаиси) – ослабление частотной характеристики, низкочастотные колебания не зафиксированы, и материальный ущерб был незначительным.

Важное замечание состоит в том, что теоретически предсказанное [Файн, 1984] усиление низкочастотной компоненты цунами на шельфе Северных и Южных Курил не было подтверждено ранее на практике. Очевидно, это связано с тем обстоятельством, что для проявления шельфового резонанса необходимо присутствие в спектре исходного сигнала соответствующей составляющей. В открытом океане периоду

80 мин отвечает длина волны около 1000 км. Для возбуждения волн цунами с такими пространственными масштабами необходим источник с близкими линейными размерами, что может наблюдаться лишь при самых сильных землетрясениях, к которым и относится анализируемое событие.

Не менее интересный материал для анализа был получен при оцифровке записей береговых самописцев уровня моря близкого Шикотанского землетрясения (рис. 7). Среди особенностей этого события отметим два момента. Во-первых, сложный характер развития волнового процесса во времени с несколькими всплесками интенсивности, примерно одинаковыми на разных станциях. Обычно это не характерно для

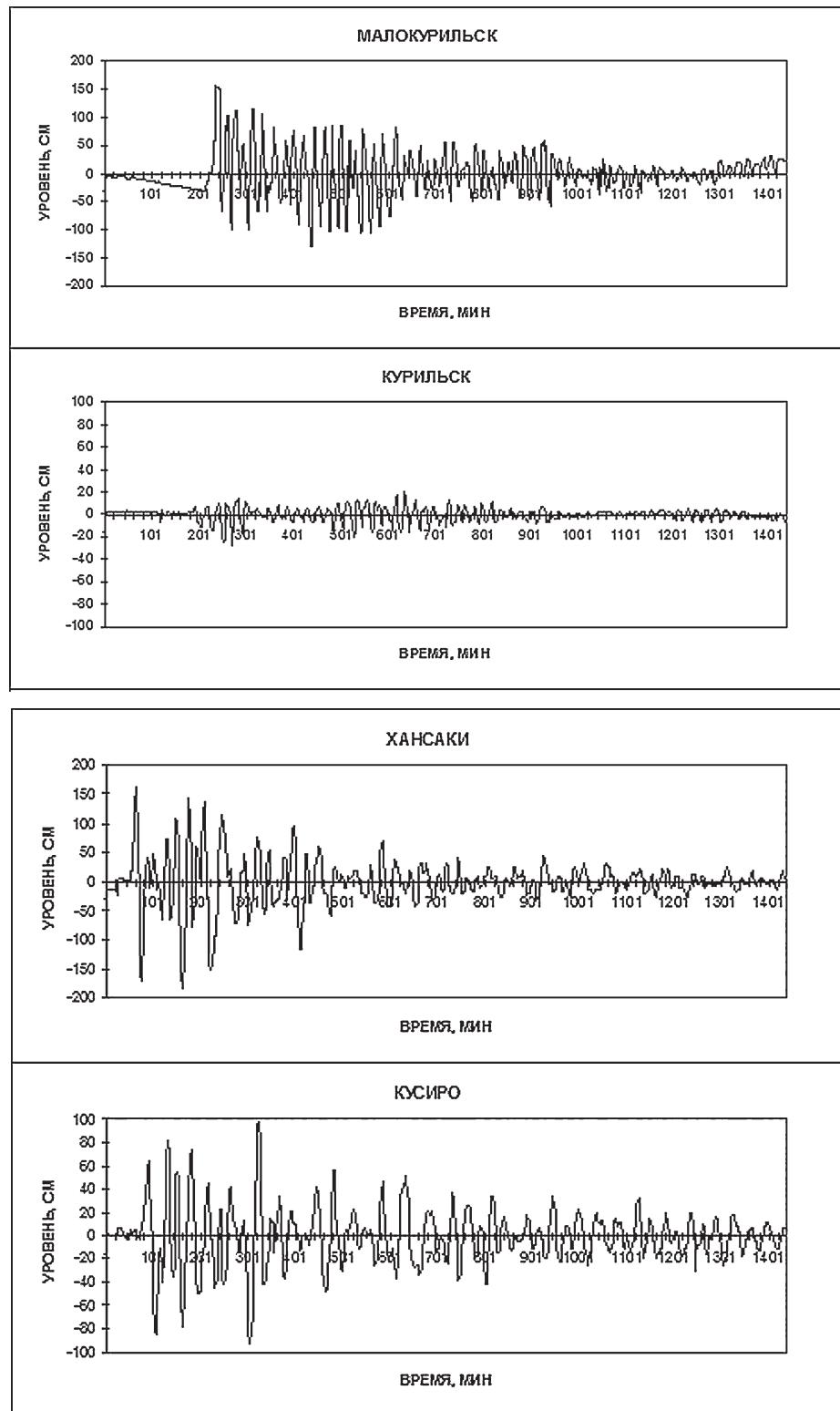


Рис. 7. Записи Шикотанского цунами 5 октября 1994 г. на станциях Малокурильское (о. Шикотан), Курильск (о. Итуруп), Хансаки и Кусиро (о. Хоккайдо)

цунами от близких землетрясений. В работе [Ивельская, Шевченко, 1997] высказывалось предположение, что причиной такой структуры сигнала могла быть серия афтершоков, с моментами которых наблюдалась достаточно высокая корреляция. Однако магнитуды

этих толчков были существенно ниже значений, при которых возбуждаются волны цунами.

Второй примечательной особенностью было достаточно четкое различие основных периодов колебаний на российских и японских станциях. Так,

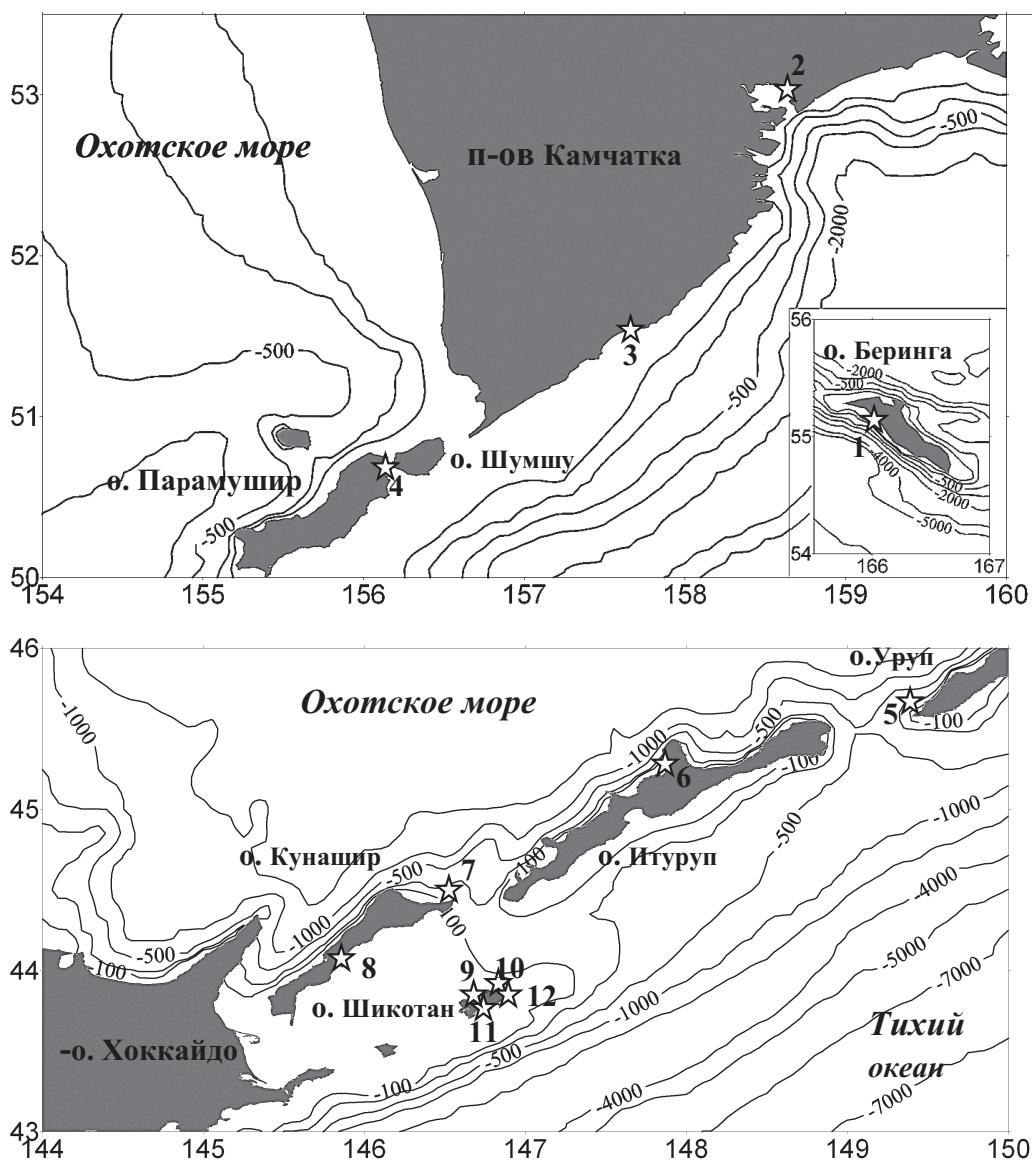


Рис. 8. Положение телеметрических регистраторов цунами в северной (верхний рисунок, 1 – Никольское, 2 – Петропавловск-Камчатский, 3 – Водопадная, 4 – Северо-Курильск) и автономных донных станций ИМГиГ ДВО РАН (5 – мыс Ван-дер-Линда, 6 – залив Китовый, 7 – мыс Ловцова, 8 – Южно-Курильск, бухты: 9 – Крабовая, 10 – Малокурильская, 11 – Цероквная, 12 – Маячная) в южной части тихоокеанского побережья России

в Малокурильском и Курильске, расположенных по направлению малой оси очага землетрясения, преобладали волны с периодами около 20 мин. Этот период является резонансным для Малокурильской бухты, но не для залива Китовый. На побережье о. Хоккайдо, находившегося по направлению большой оси источника, главную роль играли более низкочастотные волны. Этот пример иллюстрирует влияние эффектов, связанных с направленностью излучения источника цунами.

В последние годы основным материалом для изучения особенностей проявления цунами стали записи цифровых измерителей колебаний уровня моря. ИМГиГ ДВО РАН в конце 1960-х – начале 1970-х годов был пионером в разработке специальной аппаратуры для дистанционного измерения длинных

волн в диапазоне периодов цунами-регистраторов придонного гидростатического давления. В сентябре 1969 г. были проведены одни из первых инструментальные измерения длинных волн в диапазоне периодов цунами [Жак, Соловьев, 1971]. В феврале 1981 г. на шельфе о. Шикотан была выполнена первая в мире регистрация цунами датчиком, установленным на глубине около 100 м, показано заметное увеличение высот волн на берегу по сравнению с глубоководной станцией [Дыхан и др., 1981]. Длительное время исследовательская регистрация велась нерегулярно, но в 2006 г. институт возобновил мониторинг цунами на Южных Курильских островах, а в 2008 г. разнесенная сеть станций заметно расширилась (рис. 8) [Левин и др., 2009]. В настоящее время автономные и кабельные регистраторы ИМГиГ ДВО РАН уста-

новлены для исследовательских целей, эти датчики в оперативном прогнозе не участвуют. Полученные на них записи можно использовать только для апостериорного изучения особенностей проявления цунами – определения моментов прихода и высот первой и максимальной волн, основных периодов колебаний и т. д. Но в данный момент эти станции дополняют сеть регистраторов Службы предупреждения цунами, что позволяет изучать особенности проявления цунами на обоих флангах Курильской гряды.

Начало развертывания сети исследовательских регистраторов уровня совпал с активизацией проявлений цунами – были зарегистрированы Симуширские цунами 2006 и 2007 гг. Однако 2008 год оказался на удивление спокойным – отмечено одно очень слабое цунами и один умеренный шторм [Левин и др., 2009]. Но 2009 г. и первая половина 2010 г. оказались наиболее богатыми на опасные события. Были получены записи цунами от одного близкого (Симушир, 15 января 2009 г.) и нескольких удаленных землетрясений – Индонезийского 3 января; Самоа 29 сентября и Вануату 7 октября 2009 г., а также Чилийского 27 февраля 2010 г. Помимо цунами были зафиксированы несколько сильных штормов, причем 23–24 января 2009 г. и 3–4 августа 2010 г. в записях выделены аномальные колебания, сходные по своим характеристикам с цунами. Поскольку в Тихом океане в этот период не было отмечено сильных землетрясений, данные события мы отнесли к разряду метео-циунами, так как наиболее вероятно, что они были обусловлены прохождением резко выраженных атмосферных фронтов.

Рассмотрим подробно характеристики двух удаленных цунами, измеренных в северной (датчики СПЦ) и южной (автономные станции ИМГиГ ДВО РАН) частях Курильской островной гряды.

Самоа цунами 29 сентября 2009 г. По данным Геологической службы США (USGS), землетрясение с моментной магнитудой $M_w=8$ произошло 29 сентября в 17 часов 48 минут UTC в районе островов Самоа, его эпицентр находился в точке с координатами $15,56^\circ$ ю. ш. и $172,07^\circ$ з. д. на глубине 18 км. Это землетрясение вызвало заметное цунами, которое было зарегистрировано многими датчиками на побережье Тихого океана. Волнам цунами потребовалось около 10 часов, чтобы достигнуть побережья Курильской островной гряды, где были получены записи на восьми автономных станциях ИМГиГ, а также в порту Северо-Курильска (о. Парамушир) (см. рис. 8). На рис. 9 приведены содержащие цунами отрезки записи за 30 сентября, полученные в Северо-Курильске и в бухте Церковная (о. Шикотан) на разных флангах Курильской гряды, а также спектры колебаний уровня моря. Спектры рассчитывались по отрезкам суточной продолжительности, один из которых содержал цунами, а второй предшествовал ему и использовался для характеристики фоновых условий.

В бухте Церковная датчик был расположен достаточно далеко от входа в бухту, в мелководной про-

токе, поэтому определить момент первого вступления сложно. С уверенностью к цунами можно отнести положительный импульс высотой 21 см, отмеченный в 5:08. Максимальная волна (36 см) зафиксирована в 11:21, после 13:00 интенсивность колебаний стала плавно уменьшаться и к 20:00 вышла на обычный уровень.

Не менее сложна ситуация с определением момента вступления цунами в Северо-Курильске. Здесь, начиная с 4:40 UTC, зарегистрирован цуг волн с периодами около 12 мин и амплитудами 5–6 см, затем характер колебаний заметно изменился – амплитуда возросла до 15–20 см, а период, наоборот, уменьшился. Максимальная высота волны отмечена в 10:54 и составила 25 см.

В бухте Церковная интенсивность колебаний увеличилась в диапазоне периодов от 4 до 20 мин. Последний отвечает нулевой моде собственных колебаний бухты, хотя в спектре естественного длинноволнового фона он несколько смещен влево. Другие резонансные пики, отвечающие периодам около 4, 6 и 11 мин, хорошо выражены как в обычных условиях, так и цунами.

В Северо-Курильске Самоа цунами проявилось в диапазоне периодов от 3,5 до 20 мин, но наиболее значимым оно было на периодах около 5 мин (уровень энергии колебаний вырос более чем на 2 порядка), 8 и 16 мин. Периоды 8 и 16 мин и ранее отмечались в спектрах цунами на данной станции, в то время как пик с периодом 5 мин ранее не обнаруживался [Дуценко и др., 2003]. Возможно, его появление связано с проведением работ по реконструкции порта.

В целом, Самоа цунами на побережье Курильских островов проявилось главным образом в диапазоне периодов 5–20 мин. Это не очень характерно для удаленных цунами, которые обычно проявляются как низкочастотные колебания, тогда как короткие волны быстро затухают при распространении на большие расстояния. Вероятно, именно с этим связаны сравнительно небольшие высоты данного цунами, хотя другое свойство цунами от удаленных источников – значительная продолжительность волнового процесса, в данном случае проявилось в полной мере.

Чилийское цунами 27 февраля 2010 г. Второе зарегистрированное цунами было гораздо более опасным. Землетрясение с моментной магнитудой $M_w = 8,8$ (USGS) произошло в 06:34 UTC 27 февраля у берегов Чили. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами $35,846^\circ$ ю. ш. и $72,719^\circ$ з. д., глубина очага составила около 35 км. Это землетрясение вызвало волны цунами значительной высоты, которые представляли серьезную угрозу для большей части побережья Тихого океана, включая дальневосточное побережье России. В этой связи вспоминается сильнейшее землетрясение 22 мая 1960 г., произошедшее полвека назад у побережья Чили, которое вызвало волны цунами высотой до 6–7 м на берегах Курильских островов и Камчатки.

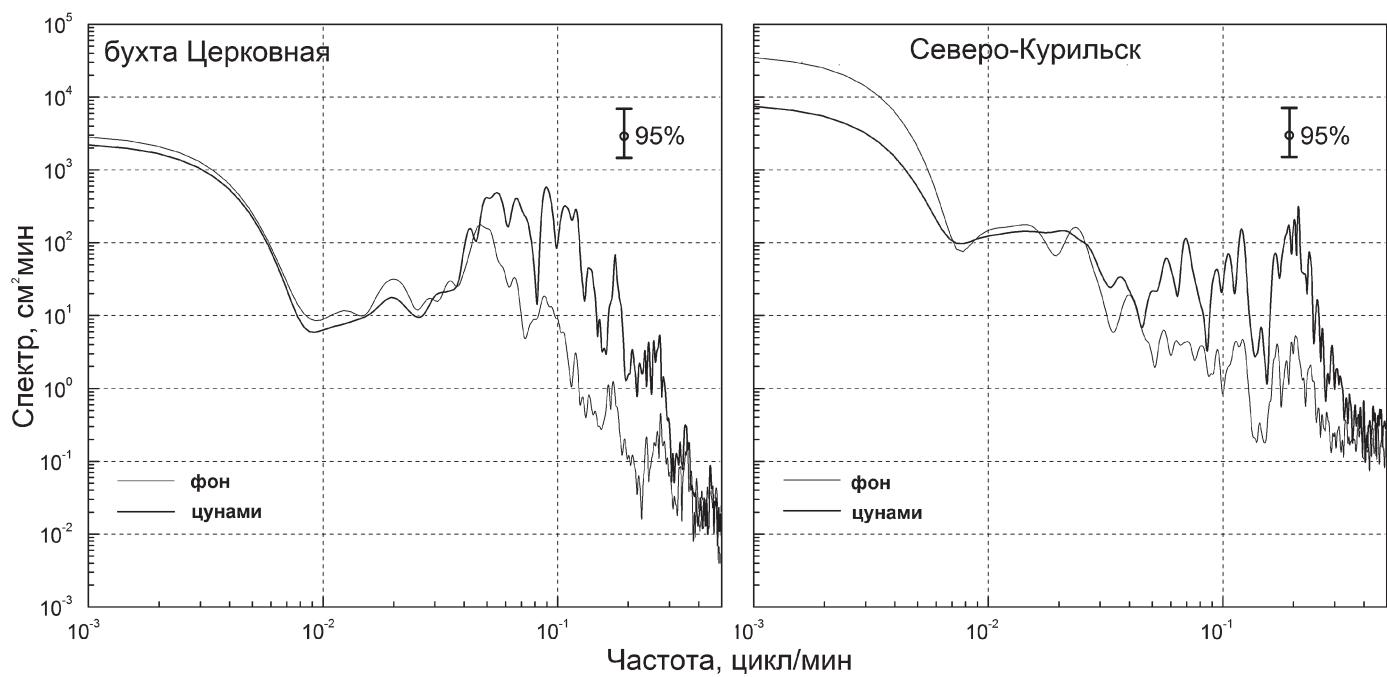
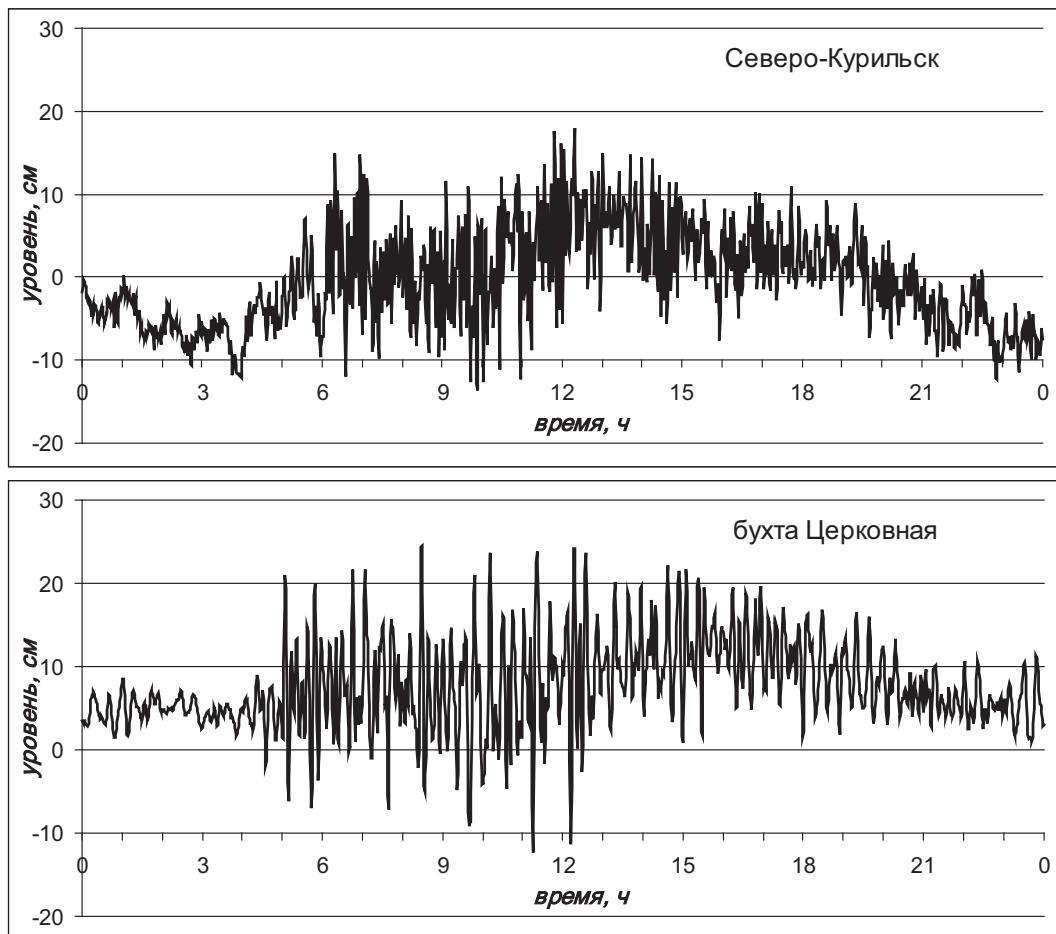


Рис. 9. Непериодические колебания уровня моря 30 сентября 2009 г., содержащие Самоа цунами, зарегистрированные в Северо-Курильске (о. Парамушир) и бухте Церковной (о. Шикотан). Приведены спектры, рассчитанные по отрезкам суточной продолжительности за 30 сентября (циунами) и предшествующую ему (естественный длинноволновый фон)

Время распространения цунами от источника до дальневосточных берегов России составило около 21 часа, волны цунами вначале достигли Командорских островов, затем Камчатки и Северных Курил, существенно позже – Южных Курильских островов. Первое вступление цунами было отмечено на станции Никольское (о. Беринга) 28 февраля в 3:15 UTC. Однако необычный для станций открытого побережья характер и малые амплитуды колебаний (максимальная высота волны 24 см) в данном пункте заставили отнестись к использованию этих материалов с осторожностью.

Гораздо более информативной для решения вопросов оперативного прогноза оказалась станция Водопадная на юго-восточном побережье Камчатки. Первая волна (положительный импульс высотой 34 см) зафиксирована здесь в 3:40, на 25 минут позже, чем в Никольском. Первая из волн с достаточно большой высотой (89 см) достигла этой станции спустя 1 час 25 мин, в 5:05. Максимальная волна была зафиксирована еще на 55 мин позже, ее высоты составила 118 см.

Еще одна станция, наблюдения на которой сыграли важную роль в работе Службы предупреждения цунами, – Северо-Курильск. Регистратор длинных волн расположен в порту, который находится на берегу Второго Курильского пролива и удален от океанского побережья. Поэтому первая волна (также как и в Никольском, слабый положительный импульс) здесь отмечена в 04:28 UTC, на 48 минут позже, чем на станции Водопадная. После нескольких сравнительно слабых колебаний, в 8:20 UTC, т. е. почти через четыре часа после вступления цунами, была зафиксирована волна с максимальной высотой 228 см (см. рис. 9). Это очень значительное запаздывание, по существовавшим нормативам СПЦ за это время должна была выдать отбой тревоги цунами. Аналогичная ситуация возникла при регистрации Симуширского цунами 15 ноября 2006 г. в бухте Малокурильская (опасная волна была зафиксирована примерно через 3,5 часа после вступления). Наличие телеметрических регистраторов и возможность оперативного контроля развития волнового процесса в подвергающихся опасности районах в определенной мере снимает остроту данной проблемы.

На южном фланге Курильской гряды телеметрические регистраторы еще не установлены, в настоящее время инструментальные данные о характере проявления цунами в данном районе можно получить только при помощи станций ИМГиГ ДВО РАН. Соответственно, в оперативных целях эти материалы не использовалась.

В бухте Церковная момент прихода цунами также несложно определить – в 4:53, практически в то же самое время, зафиксирована волна с высотой 22 см (от подошвы до гребня). Интенсивные колебания с высотами волн более 1 м наблюдались до 16 часов, а на обычный уровень они не вышли до конца суток. Первое значительное колебание с высотой 165 см отмечено почти на два часа позже, в 6:50, а наиболь-

шая волна с высотой 184 см – в 8:16. И если первая волна хорошо согласуется с результатами наблюдений на океанском побережье Хоккайдо [Ивельская и др., 2010], то вторая наблюдалась на Шикотане примерно на час раньше.

В Малокурильской бухте из-за постоянного присутствия колебаний основной моды с периодом около 19 мин, вступление цунами идентифицировать всегда весьма сложно. Скорее всего, момент прихода Чилийского цунами можно отнести к 4:40; высота первой волны составила около 14 см. Амплитуды волн в данном бассейне увеличивались сравнительно быстро, и в 6:38 было зафиксировано колебание с размахом около 80 см. Максимальная волна имела высоту 91 см и наблюдалась почти на два часа позже, в 8:29.

Расчет спектральных характеристик выявил в Северо-Курильске значительное возрастание энергии колебаний по сравнению с обычными условиями в диапазоне периодов от 5 мин до 2 часов, причем наиболее существенным оно было на периодах 45 и 60 мин (примерно 3,5 порядка) (рис. 10). Отметим, что в спектрах колебаний при других цунами, зарегистрированных ранее в этом пункте, также отмечалось усиление в данном частотном диапазоне, наиболее сильное на часовом периоде [Дущенко и др., 2003].

В бухте Церковная на океанском побережье о. Шикотан возрастание энергии началось с периода 3 мин, который отвечает собственной моде бухты. Но ни эта, ни другие высокочастотные моды большой роли в формировании волнового поля при цунами не сыграли – если в спектре естественного фона пики с периодами около 4 и 6 мин выражены хорошо, то при цунами они выделяются не так отчетливо. Четко выделяется пик на периоде основной моды (19 мин), причем можно отметить его расщепление, которое служит характерной особенностью модулированного сигнала. Но наиболее значимое повышение спектральной плотности отмечено в низкочастотной области спектра, на периодах 30–80 мин, особенно на периоде около 50 мин, на котором в спектре фона обнаруживается слабый максимум.

Такое существенное различие в частотном распределении энергии Самоа и Чилийского цунами обусловлено характером направленности излучения в источнике. В первом случае основная энергия источника была ориентирована на юго-запад и северо-восток, соответственно максимальные волны отмечены на островах Тихого океана и побережье США (<http://wcatwc.arh.noaa.gov/about/tsunamimain.php>). Соответственно, в сторону побережья России и Японии распространялись более короткие и слабые волны. Во втором случае основной поток энергии был ориентирован на север-северо-запад и в направлении Курильской гряды двигались сравнительно низкочастотные волны [Ивельская и др., 2010]. Рассмотренные примеры показывают, что направленность излучения может оказывать существенное влияние на характер проявления цунами на побережье как от близких, так и удаленных источников.

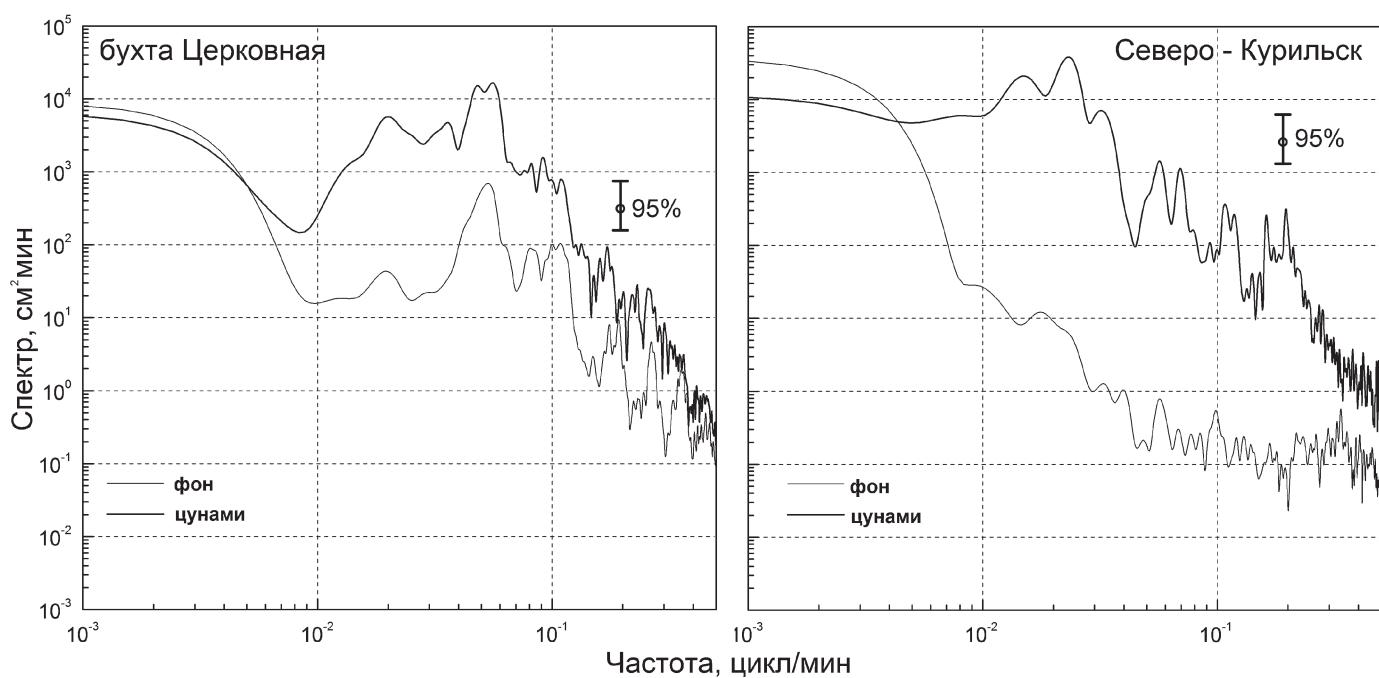
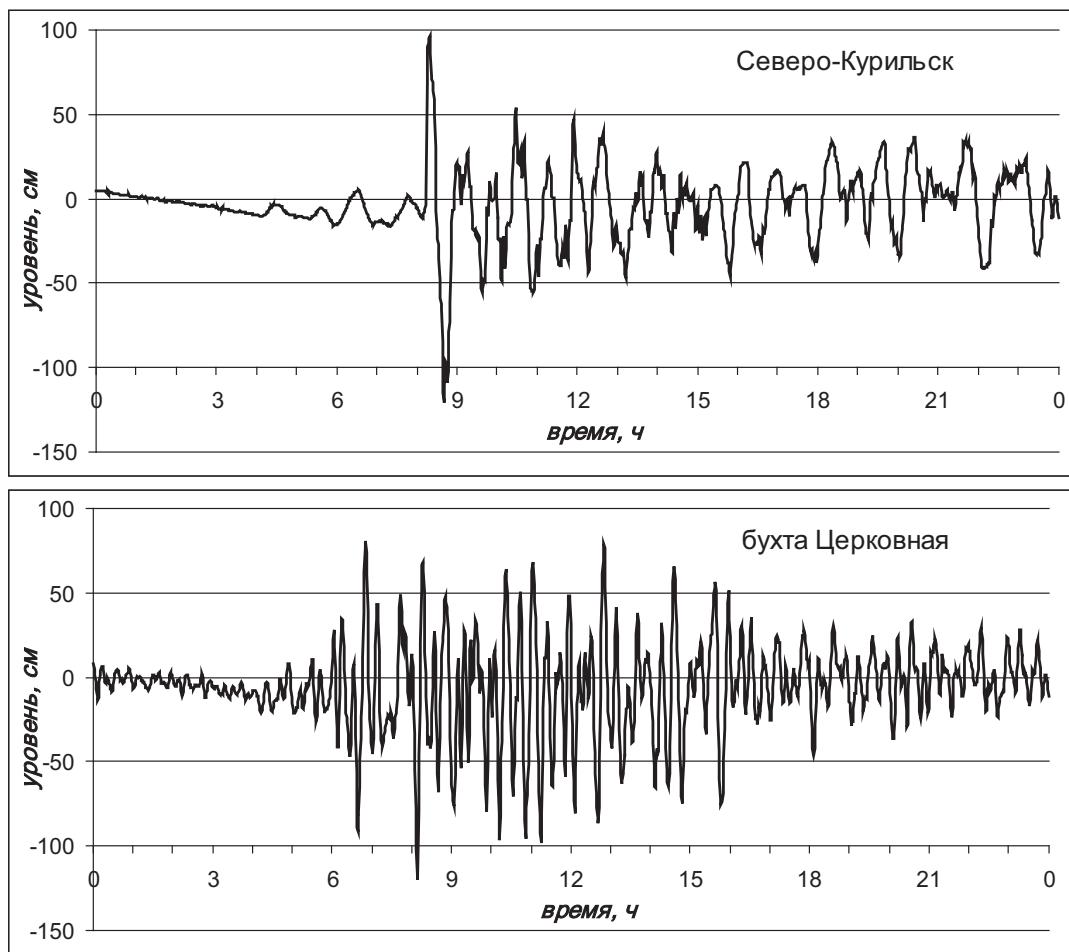


Рис. 10. Непериодические колебания уровня моря 28 февраля 2010 г., содержащие Чилийское цунами, зарегистрированные в Северо-Курильске (о. Парамушир) и бухте Церковной (о. Шикотан). Приведены спектры, рассчитанные по отрезкам суточной продолжительности за 29 февраля (циунами) и предшествующие ему (естественный длинноволновый фон)

В целом, проведенный анализ показал, что Чилийское цунами, наблюдавшееся на дальневосточном побережье России 28 февраля 2010 г., проявилось в достаточно широком диапазоне периодов от 5 минут до двух часов. Главный максимум на всех станциях отмечен на периодах около 45–50 мин вне зависимости от того, был он резонансным для района регистрации или нет. Это указывает на то, что данные колебания обусловлены процессами в источнике цунами, в то время как максимумы на периодах 30 и 60 мин на Северных Курилах и на юго-восточном побережье Камчатки связаны с резонансными свойствами прилегающего шельфа.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ

Вторым, помимо Службы предупреждения, видом мер по снижению риска негативного воздействия цунами на объекты береговой инфраструктуры является расчет цунамиопасности (возможной высоты волны на данном участке побережья повторяемостью 1 раз в 50 или 100 лет) и создание соответствующих карт. Такие оценки необходимы для оптимального выбора места для размещения новых промышленных объектов в прибрежной зоне или выбора необходимых мер по его защите на этапе проектирования.

Методика построения карт цунамиопасности основана на построении региональной функции повторяемости высот цунами, параметры которой определяются по информации о заплесках исторических цунами. Обычно такая информация известна для населенных пунктов и мест, где проводились специальные исследования по сбору информации об исторических цунами. Функция повторяемости определяется двумя параметрами – средней частотой цунами в регионе f и характеристической высотой цунами в данном месте H^* . Проектировщикам для определения необходимых прочностных характеристик новых объектов необходима обычно максимальная высота цунами с повторяемостью 1 раз в 100 лет, которая определяется по формуле $h_{100} = H^* \ln(100 \cdot f)$.

В результате анализа имеющихся данных выявлено, что средняя частота цунами в южной части Курильской гряды наиболее высока и составляет 17 случаев в столетие. В северном направлении величина данного параметра уменьшается, для Северных Курил почти вдвое (9–10 случаев в столетие), и еще сильнее – для побережья п-ва Камчатка (7 случаев в столетие).

Поскольку пунктов с надежными данными о проявлениях цунами немного, полученные для них оценки возможных высот распространялись на прилегающие участки побережья на основе результатов моделирования всех сильнейших цунами в каждом из изучаемых районов. Для Южных Курильских островов моделировались цунами от четырех близких (7 ноября 1958 г.,

13 октября 1963 г., 12 сентября 1969 г. и 5 октября 1994 г.), а также одного удаленного (Чили, 22 мая 1960 г.) землетрясений. Интенсивность проявления других цунами была существенно меньше и на параметры функции повторяемости не они оказывали существенного влияния. Расчеты проводились по упрощенной модели очага, которая определялась магнитудой и глубиной гипоцентра [Поплавский, Храмушкин, 2008]. Использовалась аппроксимация реального рельефа с пространственным шагом 1 км, что позволило обеспечить расчет высот цунами редкой повторяемости с шагом вдоль берега около 2 км. Результаты расчетов приведены на рис. 11, из которого видно, что район Южно-Курильска (в особенности к северу от поселка), а также побережье залива Касатка на о. Итуруп, где находится портпункт Буревестник, характеризуются высокой степенью цунамиопасности.

Для Северных Курил моделировались только два близких события: Камчатское цунами 5 ноября 1952 г. и Карагинское цунами 22 ноября 1969 г., учитывалось также удаленное Чилийское цунами 22 мая 1960 г. Остальные цунами не оказывали существенного влияния на параметры функции повторяемости высот волн цунами. Побережье Второго Курильского пролива, где проживает практически все население района (поселки Северо-Курильск, Байково, Козыревский), также относится к районам с очень высокой степенью опасности цунами. Гораздо менее опасные участки охотоморского побережья о. Парамушир, где ранее также имелись населенные пункты, в настоящее время практически безлюдны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПАЛЕОЦУНАМИ

Если для размещения каждого отдельного объекта наиболее востребованы оценки возможных высот волн повторяемостью 1 раз в 100 лет, то для оценки цунамиопасности существующих населенных пунктов в целом нужны расчетные высоты волн на порядок большей повторяемости. В то же время ограниченное число наблюденных событий в историческое время не позволяют статистически достоверно определить повторяемость и максимальную высоту заплесков для большинства прибрежных пунктов в Дальневосточном регионе.

Во многих странах, где побережья периодически подвергаются цунами, период исторических наблюдений за этим явлением также короток. В связи с этим, с конца 1980-х годов во всем мире приобрели большую актуальность исследования отложений цунами, как исторических, так и доисторических (палеоцунами). Первые работы по изучению отложений цунами были выполнены в конце 80-х – начале 90-х годов в Японии [Minoura, Nakaya, 1991; Minoura et al., 1994; Nishimura, Naomichi, 1995]. В последующий



Рис. 11. Пространственное распределение возможных высот волн цунами для периода повторяемости 100 лет на побережье Южных Курильских островов

период подобные работы проводились на западном побережье США и Канады, на Гавайских островах, в Чили, Индонезии, Никарагуа и в ряде других стран, подверженных цунами.

В России первые работы по изучению отложений цунами начались на Камчатке и на Сахалине в начале – середине 1990-х годов [Мелекесцев и др., 1994; Булгаков и др., 1995; Minoura et al., 1996]. Чуть позднее в литературе появились первые данные о палеоцунами на Курильских островах [Разжигаева и др., 2006, 2007].

В 1993 г. впервые были идентифицированы четыре горизонта цунамигенных отложений на Камчатском полуострове, расположенном к востоку от пос. Усть-Камчатск [Мелекесцев и др., 1994]. Начиная с 1995 г., исследования отложений цунами на Камчатке стали проводиться ежегодно. Геологические следы более чем 40 цунами, произошедших за последние 7000 лет, были обнаружены в 1995 г. на побережье Кроноцкого залива [Пинегина и др., 1997, 2000; Pinegina et al., 2003]. Полученные данные позволили реконструировать не только параметры отдельных цунами на побережье (такие как вертикальный и горизонтальный заплески), но и поставить задачу об оценке периода повторяемости крупных цунамигенерирующих землетрясений в голоцене [Pinegina, Bourgeois, 2001].

За последнее десятилетие, на различных участках Курило-Камчатского побережья были идентифицированы и датированы сильнейшие цунами, произошедшие здесь на протяжении последних нескольких

тысяч лет. Методика изучения отложений цунами подробно изложена во многих работах, например [Minoura et al., 1996; Пинегина и др., 2000; Morton et al., 2007]. Остановимся лишь на некоторых основных аспектах.

Предварительно участки для поиска и изучения отложений цунами выбираются после анализа аэрофото- и космических снимков и топографических карт. На их основе выделяются участки побережья, где на протяжении длительного времени могут сохраняться цунамигенные отложения (не должны быть в зоне воздействия флювиальных и склоновых процессов). Желательно, чтобы прибрежный рельеф состоял из разных высотных уровней, а конфигурация побережий не препятствовала свободному проникновению цунами. Кроме того, собираются описания исторических цунами на предполагаемом участке исследований. Отложения исторических цунами служат опорными для оценок интенсивности более древних событий.

Во время проведения полевых работ на выбранном участке побережья проводится съемка топографических профилей от уреза воды на расстояние максимальных заплесков цунами – через пляж и береговые валы. Обычно профили измеряются через каждые несколько километров вдоль берега. Вдоль профилей закладываются геологические шурфы и в них описываются геологические разрезы. Как правило, вдоль каждого профиля закладывается от 5 до 20 шурфов. Глубина шурфов составляет в среднем от 1 до 4 м –

в зависимости от возраста поверхности и скорости накопления почвы. Из разрезов отбираются образцы для минералогического, радиоуглеродного, диатомового, гранулометрического и других анализов с целью определения генезиса, возраста и прочих особенностей прослоев.

На Дальнем Востоке, в частности на Камчатке, датирование отложений цунами тесным образом связано с возможностью применения метода тифрохронологии. Метод основан на изучении и корреляции маркирующих горизонтов вулканических пеплов (тефры), каждый из которых имеет характерный облик, химический и минералогический состав и распространение на большой территории. В ряде случаев, для определения возраста отложений цунами применяется непосредственно метод радиоуглеродного датирования (^{14}C).

Подавляющее большинство очагов крупных землетрясений, вызывающих цунами на Дальнем Востоке России, расположено вдоль Курило-Камчатского глубоководного желоба. Таким образом, по отложениям цунами можно восстанавливать повторяемость сильных цунамигенных землетрясений на том или ином отрезке зоны субдукции, а на основе оценок интенсивности цунами (для этого надо знать распределение высот заплесков на достаточно протяженном участке побережья) – примерные размеры и положение их очагов. Помимо исследования отложений цунами, для каждого участка побережья необходимо провести реконструкцию положения древней береговой линии и определить высоту рельефа на различные моменты времени. Это особенно важно для зоны субдукции, для которой характерны значительные вертикальные подвижки.

На основе данных, полученных в ходе экспедиционных исследований 1995–2009 гг., были проана-

лизированы и по возможности скоррелированы отложения исторических и доисторических цунами вдоль побережья от Петропавловска-Камчатского до южной оконечности о. Парамушир. На основании этих данных были выделены наиболее сильные цунами и менее значительные события для последних 1500 лет. Два наиболее сильных исторических цунами произошли на Камчатке и Северных Курилах в 1952 и 1737 гг. Данные, полученные по отложениям цунами, позволили сделать вывод о том, что очаги этих землетрясений были сопоставимы по размеру и примерно совпадали пространственно [Кравчуновская и др., 2009]. Также было установлено, что за последние 1500 лет в этом же районе произошло еще как минимум 3 или 4 катастрофических цунами (т. е. в среднем 1 событие в 250–300 лет) (рис. 12). Судя по интенсивности проявления реконструированных цунами и на основе сравнения их с историческими событиями можно предполагать, что они были генерированы землетрясениями с $M \geq 8$. Прочие отложения цунами, не коррелируемые между различными участками побережья, могли быть связаны с более слабыми землетрясениями.

В ходе исследований особое внимание было уделено изучению отложений цунами на Халактырском пляже в районе Петропавловска-Камчатского [Пинегина и др., 2002]. По полученным данным было выявлено, что за последние 3500 лет максимальная дальность горизонтальных заплесков цунами в этом районе не превышала первого километра. Таким образом, в случае объявления тревоги цунами, 1 км можно принять за минимальное расстояние, на которое необходимо проводить эвакуацию. В целом же, по отложениям цунами было установлено, что в Авачинском заливе, на побережье которого расположены

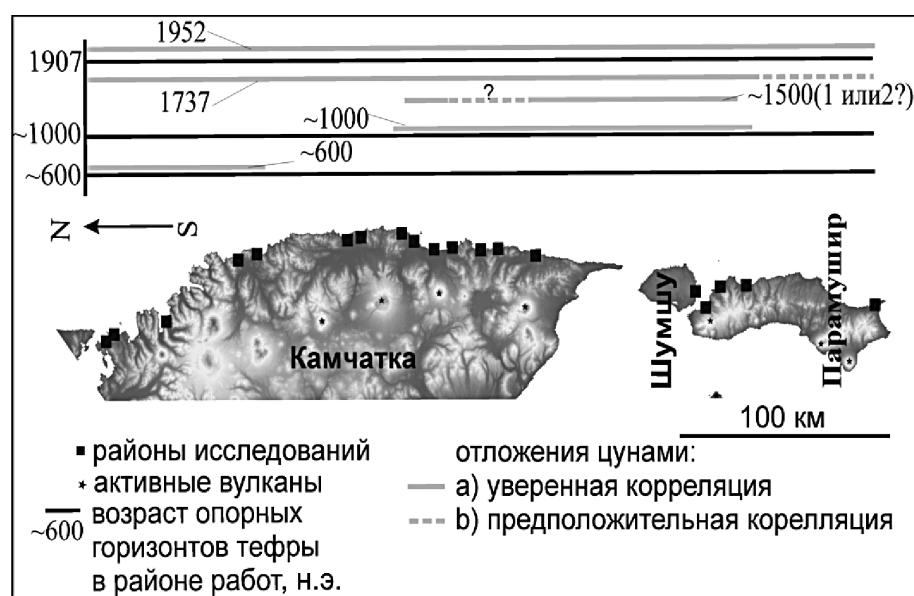


Рис. 12. Корреляция отложений наиболее сильных цунами, произошедших вдоль Южной Камчатки и северных Курил за последние 1500 лет [Пинегина, Буржуа, 2009]. Длина серых линий примерно соответствует длине очагов цунамигенерирующих землетрясений, приуроченных к Курило-Камчатской зоне субдукции

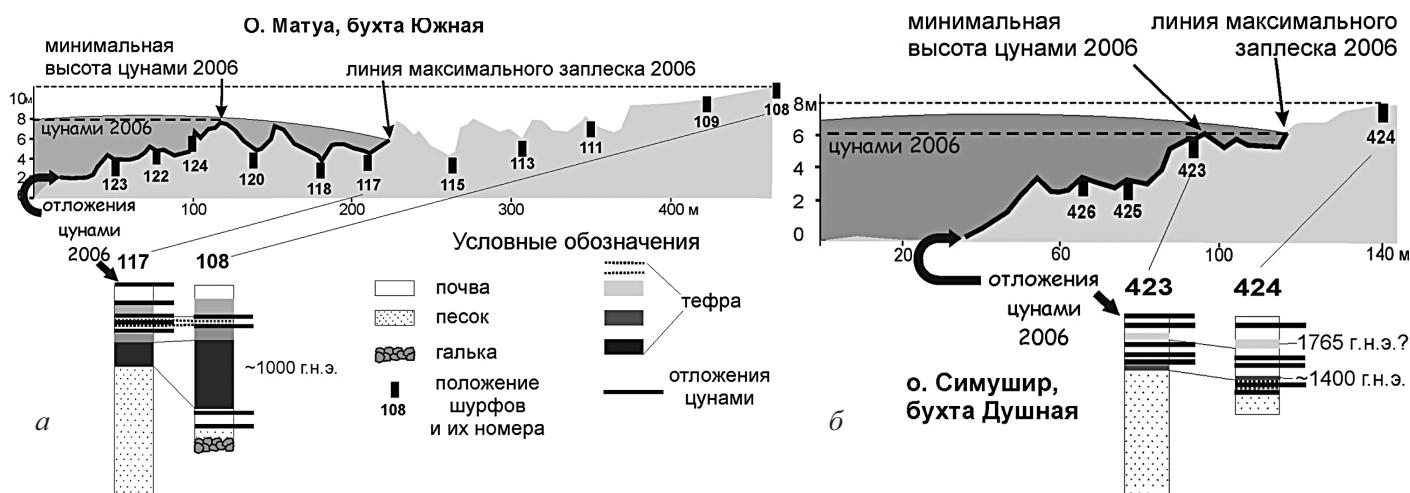


Рис. 13. Отложения цунами на о. Матуа (а) и на о. Симушир (б). По интенсивности выявленные палеоцунами сопоставимы либо превосходят цунами 15 ноября 2006 г. [Пинегина и др., 2008]

жен Халактырский пляж, сильные цунами (с высотой вертикальных заплесков на побережье $\geq 5-6$ м) происходят в среднем раз в 60 лет.

В 2006–2009 гг. были проведены комплексные исследования на Курильских островах, в том числе исследовались и отложения цунами. Полученные данные показали, что Центральные Курилы сейсмически так же активны, как и остальная часть Курило-Камчатской дуги [Пинегина и др., 2008; MacInnes *et al.*, 2009a, б]. Существовавшая здесь до 2006 г. сейсмическая брешь была практически заполнена во время сильных цунамигенерирующих землетрясений 2006–2007 гг. Произошедшие события предоставили уникальную возможность сопоставить параметры цунами (вертикальные и горизонтальные заплески, характер отложений) с аналогичными параметрами более древних событий. По предварительным данным, цунами, сопоставимые с 2006 г. либо более интенсивные, происходили в позднем голоцене на Центральных Курилах раз в 200–500 лет. Эти цунами могли быть вызваны землетрясениями с $M \geq 8$ (рис. 13).

число случаев регистрации цунами из космоса в настоящее время невелико, для этого требуется благоприятное стечание обстоятельств. Как правило, удается измерить вдольтрековые вариации уровня моря только при крупных трансокеанских цунами, имеющих заметную амплитуду колебаний и распространяющихся по океану достаточно длительное время. Один из самых удачных примеров – регистрация катастрофического цунами в Индийском океане 26 декабря 2004 г. альтиметром ИСЗ Jason-1, представленная на рис. 14 из работы [Зайченко и др., 2005]. Полученная запись существенно отличается от традиционных временных рядов колебаний уровня моря в точке постановки донной станции и требует специальных методов анализа. Альтиметр фиксирует отклонение морской поверхности от уровня прилива в данной точке в момент прохождения над ней ИСЗ, и каковы они были в ней до этого (и будут позднее) остается неизвестным. С другой стороны, преимуществом спутниковых измерений служит то обстоятельство, что информация о характере волнового процесса может быть получена на значительном пространственном протяжении. В этом смысле альтиметрические материалы могут существенно дополнять данные наблюдений на глубоководных станциях DART. О самостоятельной роли спутниковых методов в изучении физики цунами и тем более в оперативной оценке опасности можно будет говорить при увеличении плотности измерений.

В числе новых перспективных направлений изучения цунами следует отметить также применение методов регистрации УНЧ геомагнитных возмущений, отражающих возможный процесс подготовки и развития цунамигенного землетрясения. Л.Е. Собисевич с соавторами [Собисевич и др., 2010] проанализировали зарегистрированные в 2007–2009 гг. волновые формы вариаций магнитного поля Земли для 30 цунамигенных землетрясений и выделили сигналы с периодом в интервале 1–2 минуты, которые можно

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЦУНАМИ

Несмотря на то что основные успехи в изучении физики цунами связаны с развитием прямых измерений цунами при помощи глубоководных и прибрежных измерителей придонного давления, необходимо упомянуть и другие возможности. Особый интерес представляет возможность измерения характеристик цунами в открытом океане при помощи альтиметров, установленных на искусственных спутниках Земли.

Из-за больших межтрековых расстояний и значительной продолжительности изомаршрутных циклов,

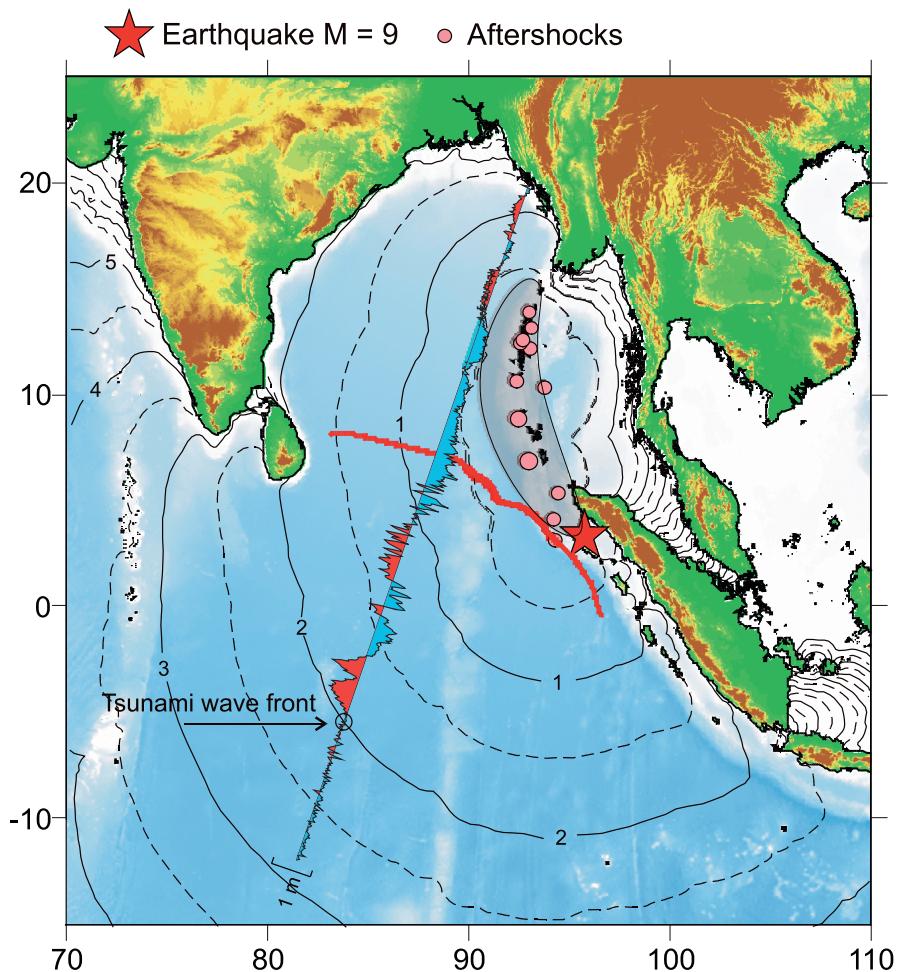


Рис. 14. Карта северо-восточной части Индийского океана с изохронами, показывающими вычисленные положения фронта цунами 24 декабря 2004 г., и трасса спутника Jason-1 (виток 109-129)

интерпретировать как геомагнитный предвестник подготовки подводного землетрясения.

Для дальнейшего изучения физики возбуждения цунами и детального анализа процессов в очаге представляется интерес проблема стоковых цунами, описанная в работе [Левин, Носов, 2008]. Лабораторное моделирование стоковых цунами как дополнения к традиционным моделям генерации цунами, вместе с обновленным анализом записей зарегистрированных реальных цунами, могут в будущем привести к лучшему пониманию физики процесса возбуждения цунами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение цунами сотрудниками Дальневосточного отделения РАН и, в частности, сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН проводится уже более 50 лет. В результате выполненных исследований накоплен уникальный фактический материал о проявлениях этого опаснейшего явления не только на дальневосточном побережье России, но и на всем побережье Тихого

океана. Достижения последнего периода связаны главным образом с детальным изучением характеристик цунами (высот и периодов волн) на основе цифрового архива записей цунами и развития сети донных регистраторов цунами и появившихся недавно телеметрических станций Службы предупреждения цунами. Информация о развитии волнового процесса в защищаемом регионе, поступающая на компьютеры дежурных операторов в реальном времени, позволяет повысить эффективность деятельности СПЦ за счет снижения числа ложных тревог и принимать более обоснованные решения о подаче сигналов тревоги цунами или ее отбоя. Новые перспективные методики изучения отложений палеоцунами и создание оригинальной методики количественной оценки цунамиопасности с построением на ее основе карт вдольберегового распределения высот волн цунами редкой повторяемости позволяют принимать адекватные решения при выборе места размещения новых объектов в цунамиопасных районах и обеспечения необходимых прочностных характеристик на этапе их проектирования.

Важность такого подхода для решения фундаментальных и практических задач, связанных с пробле-

мой цунами, была совсем недавно подтверждена событиями, произошедшими в Японии 11 марта 2011 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Булгаков Р.Ф., Иванов В.В., Храмушин В.Н., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. Исследование следов палеоцунами для цунамирионирования // Физика Земли. 1995. № 2. С. 18–27.
- Дущенко П.В., Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В. Опыт использования телеметрических регистраторов уровня моря в службе предупреждения о волнах цунами // Вестн. КРАУНЦ. Сер. «Науки о Земле». 2003. № 2.
- Дыхан Б.Д. Жак В.М., Куликов Е.А., Лаппо С.С., Митрофанов В.Н., Поплавский А.А., Родионов А.В., Соловьев С.Л., Шишкин А.А. Первая регистрация цунами в открытом океане // ДАН. СССР 1981. Т. 257, № 5. С. 1088–1092.
- Жак В.М., Соловьев С.Л. Дистанционная регистрация слабых волн типа цунами на шельфе Курильских островов // ДАН. 1971. Т. 198, № 4. С. 816–817.
- Зайченко М.Ю., Куликов Е.А., Левин Б.В., Медведев П.П. О возможности регистрации цунами в открытом океане по данным спутникового альтиметра // Океанология. 2005. Т. 45, № 2. С. 222–229.
- Золотухин Д.Е., Ивельская Т.Н. Пространственная детализация магнитудно-географического критерия цунамиопасности землетрясения в районе центральных Курильских островов // Проблемы анализа риска. 2010. Т. 7, № 2. С. 24–32.
- Иващенко А.И., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А., Йех Г., Жукова Л.Д., Золотухина Н.Д., Кайстренко В.М., Като Л.Н., Клочков А.А., Королев Ю.П., Кругляков А.А., Куликов Е.А., Куракин В.Н., Левин Б.В., Пелиновский Е.Н., Поплавский А.А., Титов В.В., Харламов А.А., Храмушин В.Н., Шельтинг Е.В. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. // Докл. РАН. 1996. Т. 348, № 4. С. 532–538.
- Ивельская Т.Н., Храмушин В.Н., Шевченко Г.В. Чилийское цунами 27 февраля 2010 года: проверка состояния службы предупреждения // Проблемы анализа риска. 2010. Т. 7, № 2. С. 34–47.
- Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В. Спектральный анализ записей Шикотанского цунами 5 октября 1994 года // Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 105–118.
- Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В. Усиление низкочастотной составляющей Чилийского цунами (май 1960 г.) в северо-западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 69–81.
- Кайстренко В.М., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А., Дыхан Г.С., Иващенко А.И., Йех Г., Като Л.Н., Клочков А.А., Пелиновский Е.Н., Предтеченский Г.С., Сасорова Е.В., Титов В.В., Харламов А.А., Шельтинг Е.В. Проявление цунами 4 октября 1994 года на Шикотане // Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 55–73.
- Королев Ю.П., Жукова Л.Д., Золотухина Н.Д., Клочков А.А., Куликов Е.А., Куракин В.Н., Кругляков А.А., Левин Б.В., Поплавский А.А., Терентьев Н.С. Проявления цунами 4 октября 1994 года на побережье Курильских островов // Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 74–92.
- Кравчуновская Е.А., Пинегина Т.К., Нишимуро Ю., Таниока Ю., Накамура Ю., Хиракава К. Сравнительная характеристика параметров цунами 1737 и 1952 гг. на Камчатке и Курильских островах по палеосейсмологическим данным // Материалы III Сахалинской молодежной научной школы «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз». ИМГиГ ДВО РАН, 2009. С. 176–180.
- Лаверов Н.П., Лаппо С.С., Лобковский Л.И. и др. Центрально-Курильская «брешь»: строение и сейсмический потенциал // Докл. РАН. 2006а. Т. 408, № 6. С. 818–821.
- Лаверов Н.П., Лаппо С.С., Лобковский Л.И., Куликов Е.А. Сильнейшие подводные землетрясения и катастрофические цунами. Анализ, моделирование, прогноз // Фундаментальные исследования океанов и морей. Кн. 1. М.: Наука. 2006б. С. 191–209.
- Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Левин Б.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В., Томсон Р.Е. Курильские цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г.: два транстихоокеанских события // Докл. РАН. 2009. Т. 426, № 3. С. 386–392.
- Левин Б.В., Кайстренко В.М., Рыбин А.В., Носов М.А., Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г., Сасорова Е.В., Ганзей К.С., Ивельская Т.Н., Кравчуновская Е.А., Колесов С.В., Евдокимов Ю.В., Бурджсуа Д., Макиннес Б., Фицхью Б. Проявления цунами 15.11.2006 г. на Центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков // Докл. РАН. 2008. Т. 419, № 1. С. 118–122.
- Левин Б.В., Носов М.А. О возможности формирования цунами в результате стока воды в сейсмические трещины дна // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44, № 1. С. 122–126.
- Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
- Левин Б.В., Чернов А.Г., Шевченко Г.В., Ковалев П.Д., Ковалев Д.П., Куркин А.А., Лихачева О.Н., Шишкин А.А. Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесенной сети станций // Докл. РАН. 2009. Т. 427, № 2. С. 239–244.
- Мелекесцев И.В., Курбатов А.В., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. «Доисторические» цунами и сильные землетрясения на полуострове Камчатском (Камчатка) по данным тифрохронологических исследований // Вулканология и сейсмология. 1994. № 5. С. 106–115.
- Пинегина Т.К., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Сторчес А.В., Гусяков В.К. Доисторические цунами на побережье Кроноцкого залива, Камчатка, Россия // Вулканология и сейсмология. 2000. № 2. С. 66–74.
- Пинегина Т.К., Бурджсуа Д., Базанова Л.И., Брайцева О.А., Егоров Ю.О. Отложения цунами и анализ цунамиопасности на Халактырском пляже в районе Петропавловска-Камчатского, Тихоокеанское побережье Камчатки, Россия // Локальные цунами: предупреждение и уменьшение риска. М.: Янус-К, 2002. С. 142–151.
- Пинегина Т.К., Бурджсуа Д., Разжигаева Н.Г., Левин Б.В., Кайстренко В.М., Кравчуновская Е.А., Макиннес Б. Цунами 15 ноября 2006 г. на Центральных Курильских островах и повторяемость подобных событий в прошлом (по палеосейсмологическим данным) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 200–204.

- Пинегина Т.К., Буржуа Дж. Основные результаты изучения палеоцунами на Камчатке, Северных и Центральных Курилах // Тезисы докл. Второй региональной науч.-технич. конфер. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2009. С. 167.
- Пинегина Т.К., Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Базанова Л.И., Сторчес А.В. Следы доисторических цунами на восточном побережье Камчатки // Природа. 1997. № 4. С. 102–107.
- Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.
- Поплавский А.А., Храмущин В.Н. Методы оперативного прогноза цунами и штормовых наводнений. Владивосток: Дальнавака, 2008. 176 с.
- Поплавский А.А., Храмущин В.Н., Непон К.И., Королев Ю.П. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. 273 с.
- Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Ильев А.Я., Каистренко В.М. Осадки цунами Шикотанского землетрясения 1994 г. // Океанология. 2007. Т. 47, № 4. С. 622–630.
- Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А. Проявление палеоцунами на о. Зеленый (Малая Курильская дуга) в голоцене // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 57–73.
- Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Наблюдения УНЧ геомагнитных возмущений, отражающих процессы подготовки и развития цунамигенных землетрясений // Докл. РАН. 2010. Т. 435, № 4. С. 548–553.
- Файн И.В. Частотные свойства Курильского шельфа // Генерация цунами и выход волн на берег. М., 1984. С. 80–83.
- Bernard E., Robinson A. Tsunamis. Harvard University Press, 2009. 450 p.
- Kaistrenko V., Sedaeva V. 1952 North Kuril Tsunami: New Data from Archives // Tsunami Research at the End of a Critical Decade / Ed. by G.T. Hebenstreit. 2001. P. 91–102.
- Levin B.W., Nosov M.A. Physics of Tsunamis. Springer, 2009. 327 p.
- MacInnes B.T., Bourgeois J., Pinegina T.K., Kravchunovskaya E.A. Before and after: geomorphic change from the 15 November 2006 Kuril Island tsunami // Geology. 2009a. V. 37. P. 995–998.
- MacInnes B.T., Pinegina T.K., Bourgeois J., Razhagaeva N.G., Kaistrenko V.M., Kravchunovskaya E.A. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the middle Kuril Islands // Pure and Applied Geophysics. 2009b. N 166. P. 9–36.
- Minoura K., Gusiakov V.K., Kurbatov A.V. Tsunami sedimentation associated with the 1923 Kamchatka earthquake // Sedimentary Geology. 1996. V. 106. P. 145–154.
- Minoura K., Nakaya S. Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from Northeast Japan // Journ. of Geology. 1991. V. 99. P. 265–287.
- Minoura K., Nakaya S., Uchida M. Tsunami deposits in a lacustrine sequence of the Sanriku coast, northeast Japan // Sedimentary Geology. 1994. V. 89. P. 25–31.
- Morton R.A., Gelfenbaum G., Jaffe B.E. Physical Criteria for Distinguishing Sandy Tsunami and Storm Deposits Using Modern Examples // Sedimentary Geology. 2007. N 200. P. 184–207.
- Nishimura Y., Naomichi M. Tsunami deposits from the 1993 southwest Hokkaido earthquake and the 1640 Hokkaido Komagatke eruption, northern Japan // Pure and Applied Geophysics. 1995. V. 144. P. 719–733.
- Pinegina T., Bourgeois J., Bazanova L., Melekestsev I., Braitseva O. A. Millennial-scale record of Holocene tsunamis on the Kronotskiy Bay coast, Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 2003. N 59. P. 36–47.
- Pinegina T.K., Bourgeois J. Historical and paleo-tsunami deposits on Kamchatka, Russia: long-term chronologies and long-distance correlations // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2001. V. 1. N 4. P. 177–185.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю.Г. Гатинский, Д.В. Рундквист, Г.Л. Владова, Т.В. Прохорова</i> СЕЙСМО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЛАВНЕЙШИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РОССИИ И БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ	13
<i>В.И. Осипов, Н.И. Фролова, С.П. Сущев, В.И. Ларионов</i> ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО И ПРИРОДНОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	28
<i>В.И. Величкин, Б.П. Власов, М.В. Шумилин</i> ОСНОВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЫВШЕГО СССР И РОССИИ	49
<i>С.А. Дмитриев, В.И. Величкин, Б.И. Омельяненко</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО УРОВНЕЙ РАДИОАКТИВНОСТИ	64
<i>В.И. Величкин, В.И. Мальковский, Н.Н. Тарасов, Ю.П. Диков</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В РАЙОНЕ ОЗЕРА КАРАЧАЙ (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ)	77
<i>Б.И. Омельяненко, В.И. Величкин, С.В. Юдинцев</i> ПОВЕДЕНИЕ АКТИНИДОВ В УСЛОВИЯХ ДОЛГОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	86
<i>С.В. Юдинцев, Б.И. Омельяненко</i> ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНЕЦИЯ	99
<i>И.Н. Соловов, А.К. Лисицын</i> ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА: ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И МЕТАЛЛЫ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ СЕРНОКИСЛОТНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ	109
<i>В.А. Петров, В.В. Полуэктов, Р.М. Насимов, А.А. Бурмистров, С.И. Щукин, Й. Хаммер</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ГРАНИТАХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ	124
<i>В.М. Котляков, Л.Н. Васильев, М.Ю. Москалевский</i> БАЛАНС МАССЫ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА	139

<i>Ю.Я. Мачерет, А.Ф. Глазовский, И.И. Лаврентьев</i> ВОДА В ПОЛИТЕРМИЧЕСКИХ И ТЕПЛЫХ ЛЕДНИКАХ	152
<i>В.Н. Михаленко, С.С. Кутузов, О.В. Нагорнов, С.А. Тюфлин, И.И. Лаврентьев, С.А. Марченко, В.И. Окопный</i> СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ФИРНОВО-ЛЕДЯНОЙ ТОЛЩИ НА ЗАПАДНОМ ПЛАТО ЭЛЬБРУСА	180
<i>Ю.П. Масуренков, А.Л. Собисевич</i> ЭЛЬБРУССКОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ – ИНДИКАТОР ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО И ФЛЮИДНОГО СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНА	189
<i>А.Н. Хименков, Г.З. Перльштейн, Д.О. Сергеев, А.Н. Власов, В.П. Мерзляков, Ю.В. Халилова</i> ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКА ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ	205
<i>Е.В. Коротеева, Е.И. Вейсберг, Н.Б. Куюнцева, С.А. Лесина</i> ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНЫХ ПРЕДГОРИЙ ЮЖНОГО УРАЛА	213
<i>А.Ю. Кудеярова</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНЫХ СОРБЦИОННЫХ БАРЬЕРОВ ПРИ ЗАФОСФАЧИВАНИИ КИСЛЫХ ПОЧВ	223
<i>И.В. Галицкая, И.А. Позднякова, Л.С. Томс</i> МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОПРИРОДНЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИМ РИСКОМ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ	239
<i>Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан</i> СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАШТАБОВ И РИСКА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА	252
<i>В.В. Адушкин, П.П. Фирстов</i> ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В АТМОСФЕРЕ	264
<i>А.Ю. Озеров</i> МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПРИРОДНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ)	279
<i>О.В. Руденко, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич</i> О ФИЗИКЕ АКУСТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И МЕДЛЕННЫХ ВОЛНАХ В ГРАНУЛИРОВАННОЙ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ	299
<i>В.Н. Николаевский</i> ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ – СОБЫТИЯ И ПРЕДВЕСТИКИ УДАРА	316
<i>Б.В. Левин, Г.В. Шевченко, В.М. Кайстренко, Т.Н. Ивельская, Т.К. Пинегина, Н.Г. Разжигаева</i> ПРОБЛЕМА ЦУНАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ АСПЕКТ)	332
<i>В.А. Семенов, И.И. Мохов, М. Латиф</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ	355

<i>Ю.Н. Авсюк, А.Л. Собисевич</i> ПРИЛИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ – ЛУНА – СОЛНЦЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ	373
<i>В.Ч. Хон, И.И. Мохов</i> ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА К ИЗМЕНЕНИЮ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ АНТРОПОГЕННЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ	392
<i>В.М. Григорьев, Л.В. Ермакова, А.В. Мордвинов, Ю.А. Наговицын, А.Г. Тлатов, В.Г. Иванов, Е.В. Милецкий, Е.Ю. Наговицына, А.И. Хлыстова, С.А. Язев</i> ВОЗНИКНОВЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ, ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ И НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ	399
<i>С.И. Сороко, В.П. Рожков, Е.Г. Сергеева, С.С. Бекшаев, С.С.Андреева, И.В.Николаев</i> ОСОБЕННОСТИ МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ И ГЕМОДИНАМИКИ МОЗГА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО СЕВЕРА	413

Научное издание

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

В 2 томах

Том 2

ГЕОЛОГИЯ УРАНА, ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ

*Печатается по решению Научного совета Программы
фундаментальных исследований президиума РАН № 4*

Ответственный составитель д.ф.-м.н. Собисевич Алексей Леонидович

Технический редактор В.И. Горбенко
Компьютерная верстка К.А. Мордвинцев
Корректор С.Б. Суслова

Подписано в печать 05.09.11. Формат 60×90/8
Гарнитура Таймс. Бумага мелованная. Печать офсетная
Усл. печ. л. 54. Тираж 200 экз.

ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН
123995 ГСП-5, Д-242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10

Отпечатано в типографии издательства «ПРОБЕЛ 2000»
109544 Москва, ул. Рабочая, 91