

В.Г. БЫКОВ, Н.В. ШЕСТАКОВ, М.Д. ГЕРАСИМЕНКО,
А.А. СОРОКИН, А.В. КОНОВАЛОВ, А.С. ПРЫТКОВ,
Н.Ф. ВАСИЛЕНКО, Д.А. САФОНОВ, А.Г. КОЛОМИЕЦ,
М.А. СЕРОВ, В.В. ПУПАТЕНКО, С.П. КОРОЛЕВ,
А.Л. ВЕРХОТУРОВ, В.С. ЖИЖЕРИН, К.С. РЯБИНКИН

Единая сеть геодинимических наблюдений ДВО РАН: становление, десять лет развития, основные достижения

Обсуждается проблема современной геодинимики Дальневосточного региона на основе мониторинга разномасштабных деформаций и сейсмичности в области сочленения Евразийской, Североамериканской, Тихоокеанской, Амурской и Охотской литосферных плит с применением современных методов космической геодезии и широкополосной сейсмологии. Дан краткий обзор этапов развития Единой сети геодинимических наблюдений ДВО РАН, основных результатов сейсмологических и GPS/ГЛОНАСС-наблюдений, полученных в рамках целевой комплексной программы научных исследований ДВО РАН «Современная геодинимика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России (2009–2013 гг.)» и проектов ДВО РАН 2014, 2018, 2019 гг., а также достигнутых позиций ДВО РАН в области геодинимики.

Ключевые слова: геодинимика, деформация земной коры, литосферные плиты, космическая геодезия, сейсмология, землетрясения, восток Евразии, архивы данных, информационная система.

Unified observation network for geodynamic monitoring in FEB RAS: formation, 10 years of development and major achievements. V.G. BYKOV¹, N.V. SHESTAKOV^{2, 3}, M.D. GERASIMENKO^{2, 3}, A.A. SOROKIN⁴, A.V. KONOVALOV⁵, A.S. PRYTKOV⁶, N.F. VASILENKO⁶, D.A. SAFONOV⁶, A.G. KOLOMIETS², M.A. SEROV⁷,

*БЫКОВ Виктор Геннадьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, ПУПАТЕНКО Виктор Викторович – кандидат технических наук, заместитель директора, РЯБИНКИН Константин Сергеевич – младший научный сотрудник (Институт тектоники и геофизики им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН, Хабаровск), ШЕСТАКОВ Николай Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой, ГЕРАСИМЕНКО Михаил Данилович – доктор технических наук, руководитель научно-исследовательской группы, профессор (Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), СОРОКИН Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, временно исполняющий обязанности директора, КОРОЛЕВ Сергей Павлович – научный сотрудник, ВЕРХОТУРОВ Андрей Леонидович – научный сотрудник (Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск), КОНОВАЛОВ Алексей Валерьевич – кандидат физико-математических наук, директор (Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН, Южно-Сахалинск), ПРЫТКОВ Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, ВАСИЛЕНКО Николай Федорович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, САФОНОВ Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск), КОЛОМИЕЦ Андрей Геннадьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник (Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток), СЕРОВ Михаил Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ЖИЖЕРИН Владимир Сергеевич – младший научный сотрудник (Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск). *E-mail: bykov@itig.as.khb.ru

Работа выполнена в рамках государственных заданий институтов ДВО РАН, в которых работают авторы статьи, и при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований РАН «Приоритетные научные исследования в интересах комплексного развития Дальневосточного отделения РАН» (проект 18-5-024).

V.V. PUPATENKO¹, S.P. KOROLEV⁴, A.L. VERKHOTUROV⁴, V.S. ZHIZERIN⁷, K.S. RYABINKIN¹ (¹Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk, ²Institute of Applied Mathematics, FEB RAS, Vladivostok, ³Far Eastern Federal University, Vladivostok, ⁴Computing Center, FEB RAS, Khabarovsk, ⁵Sakhalin Branch of the Far East Geological Institute, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, ⁶Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, ⁷Institute of Geology and Nature Management, FEB RAS, Blagoveshchensk).

The problem of the recent geodynamics of the Far East region is discussed based on monitoring of different-scale deformations and seismicity in the articulation of Eurasian, North American, Pacific, Amurian and Okhotsk lithospheric plates using modern methods of space geodesy and broadband seismology. We present a brief overview of the development stages of the Unified Network of Geodynamic Observations of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, the main results of seismological and GPS/GLONASS observations obtained within the framework of the Targeted Comprehensive Research Program of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for 2009–2013 «Recent geodynamics, active geological structures and natural hazards of the Far East of Russia», Projects of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (2014, 2018, 2019) and the achievements of FEB RAS in the field of geodynamics.

Key words: geodynamics, deformation of the earth's crust, lithospheric plates, space geodesy, seismology, earthquakes, eastern Eurasia, data archives, information system.

Введение

В России и за рубежом одним из наиболее актуальных направлений в науках о Земле является изучение современной геодинамики и новейшей тектоники поясов повышенной сейсмической активности. Это связано с исследованием проблем тектоники плит и необходимостью разработки геодинамических основ сейсмического районирования.

Организация измерительной и информационно-вычислительной инфраструктуры мирового уровня с Применением современных технических средств наблюдений (космическая геодезия, широкополосная сейсмология, радиолокационная съемка рельефа) и создание методик обработки инструментальных данных, основанных на современных информационно-вычислительных технологиях, открыло новые возможности для разработки целостной концепции современной геодинамической активности Дальнего Востока России, являющейся фундаментальной основой моделирования и прогнозирования катастрофических землетрясений, извержений вулканов, цунами и связанных с ними природных явлений и процессов.

Началом формирования такой инфраструктуры – Единой сети геодинамических наблюдений (ЕСГН) ДВО РАН – можно считать выполнение в 2006–2008 гг. институтами ДВО РАН (Институтом вулканологии и сейсмологии – ИВиС, Институтом геологии и природопользования – ИГиП, Институтом морской геологии и геофизики – ИМГиГ, Институтом прикладной математики – ИПМ, Институтом тектоники и геофизики – ИТиГ), СО РАН (Институтом земной коры – ИЗК, Институтом нефтегазовой геологии и геофизики – ИНГГ) и Камчатским филиалом Геофизической службы (ГС) РАН мероприятий в рамках интеграционного проекта «Геодинамическая модель взаимодействия Евразийской, Североамериканской и Тихоокеанской литосферных плит на Северо-Востоке Азии» (проект ДВО РАН 06-П-СО-08-030). Инициаторами проекта выступили академики С.В. Гольдин (СО РАН) и А.И. Ханчук (ДВО РАН).

Главная задача интеграционного проекта заключалась в исследовании современных движений в области сочленения Евразийской, Североамериканской, Тихоокеанской, Амурской и Охотской литосферных плит методами сейсмологии и космической геодезии (GPS/ГЛОНАСС-наблюдений). Для эффективного решения этой задачи были организованы новые пункты наблюдений в континентальной части и окраинных областях Дальневосточного региона, разрозненные GPS/ГЛОНАСС-данные объединены в единую систему с целью совместной обработки результатов измерений.

К завершению интеграционного проекта ДВО и СО РАН в 2008 г. объединенная региональная GPS/ГЛОНАСС-сеть включала 60 периодических и постоянных пунктов из 120, расположенных на территории Дальнего Востока и Сибири [1]. Исследованиями

институтов ДВО РАН и Камчатского филиала ГС РАН была охвачена огромная территория Дальневосточного региона: Еврейская автономная и Амурская области, Приморский и Хабаровский края, Камчатский край и Сахалинская область, включая Командорские и Курильские острова. На основе измерений получены новые данные для расчета движений и деформаций во внутренней части Евразийской плиты и в области сочленения Евразийской, Североамериканской, Тихоокеанской, Амурской и Охотской литосферных плит, которые дополнили представления о современной геодинамике на территории Дальнего Востока России.

Дальнейшее развитие в ДВО РАН этого направления исследований стало возможно только после принятия специальной программы. При этом изначально полагалось, что реализация такой программы может быть полностью осуществлена при условии организации ЕСГН ДВО РАН, объединении уже имеющихся GPS/ГЛОНАСС-данных академических институтов и их целенаправленной совместной обработки по единой методике.

Целевая комплексная программа (ЦКП) научных исследований ДВО РАН «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России (2009–2013 гг.)» была утверждена 2 февраля 2009 г. постановлением президиума ДВО РАН. Научным руководителем программы был назначен академик А.И. Ханчук, координатором по взаимодействию между ДВО РАН и ГС РАН – академик Е.И. Гордеев. Организации-исполнители программы – ВЦ, ИГиП, ИМГиГ, ИПМ, ИТиГ, СВКНИИ ДВО РАН.

Цель программы – разработка и применение современных методов исследований движений блоков земной коры, глубинных структур коры и верхней мантии на основе мониторинга разномасштабных деформаций и сейсмичности в области сочленения Североамериканской, Тихоокеанской, Амурской и Охотской литосферных плит.

Предполагалось, что совместный анализ сейсмичности, результатов GPS/ГЛОНАСС-наблюдений и морфоструктурных данных на основе ГИС-технологий позволит наилучшим образом отразить развитие новейших тектонических процессов и приблизиться к решению проблемы прогноза природных опасностей.

Программа включала четыре блока:

Блок 1. Деформационные процессы в земной коре (GPS/ГЛОНАСС-наблюдения).

Блок 2. Сейсмичность (проблемы сейсмичности и оценки сейсмической опасности на территории Дальневосточного региона).

Блок 3. Современная динамика литосферы, неотектоника (напряженное состояние, активные разломы и модели геоструктур на разных глубинных уровнях).

Блок 4. Разработка геоинформационной системы «Современная геодинамика Дальнего Востока России» и анализ на основе ГИС-технологий катастрофических явлений в регионе (землетрясения, цунами, извержения вулканов).

Необходимо подчеркнуть, что ЦКП «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России (2009–2013 гг.)» – это первая за всю историю ДВО РАН программа, которая объединила усилия коллективов из разных институтов для получения новых количественных оценок скоростей современных движений земной поверхности и разработки целостной концепции современной геодинамической активности Дальнего Востока России.

В ходе выполнения Программы были организованы:

- 1) единая сеть сейсмологических и деформационных наблюдений ДВО РАН,
- 2) система сбора, передачи, хранения и обработки данных GPS/ГЛОНАСС-измерений,
- 3) система сбора и хранения сейсмологических данных,
- 4) постоянно пополняющийся архив геодезических и сейсмологических данных ЕСГН ДВО РАН.

Для управления средствами инструментальных наблюдений, систематизации и обработки полученных данных была разработана автоматизированная информационная система «Сигнал» (АИС «Сигнал») [13].

Результаты организационно-технических мероприятий программы

Первоочередные организационно-технические мероприятия программы были направлены на выполнение следующих задач: организация и модернизация пунктов ЕСГН ДВО РАН; сбор, передача, хранение и обработка геодезических и сейсмологических данных; разработка специализированных компьютерных систем и сервисов.

Организация пунктов ЕСГН ДВО РАН

При организации ЕСГН ДВО РАН максимально использовался опыт и наработки сейсмологов Камчатского и Сахалинского филиалов ГС РАН. Главная задача начального этапа программы заключалась в размещении, подготовке к регистрации, отладке и запуске в эксплуатацию современной измерительной аппаратуры: цифровых широкополосных сейсмических станций REF TEK SENS-BBS-120 и двухчастотных геодезических GPS/ГЛОНАСС(ГНСС)-приемников (система Trimble NetR5) на территории Дальнего Востока. Для корректного размещения измерительного оборудования по решению Научного совета ЦКП в Институте тектоники и геофизики ДВО РАН 14–15 апреля 2009 г. был проведен семинар «Организация GPS/ГЛОНАСС и сейсмологических наблюдений ДВО РАН. Сбор, передача, обработка и хранение данных», на котором обсуждались наиболее актуальные методические и технические вопросы, связанные с развертыванием сети деформационных и сейсмологических наблюдений, паспортизацией пунктов наблюдений.

В результате было организовано 14 постоянных пунктов геодезических и сейсмических наблюдений, 10 систем применялись при измерениях в пунктах периодической регистрации по профилям Благовещенск–Сутара, Хабаровск–Лидога–Ванино и в качестве



Рис. 1. Карта размещения GPS и сейсмических станций. GPS/ГЛОНАСС и сейсмические станции REF TEK SENS-BBS-120 установлены в 2009–2010 гг., сеймостанции DATAMARK LS7000XT, STS-2 и L-4C-3D – в 2006–2009 гг. при реализации российско-японского проекта «Исследование сеймотектоники Охотоморской плиты»

резервных комплектов. Местоположение GPS/ГЛОНАСС и сейсмических станций, установленных в 2009–2013 гг. при выполнении программы и в последующие годы, показано на рис. 1.

Установка в стационарных пунктах наблюдения широкополосных сейсмических и ГНСС-станций осуществлена с целью исследования колебаний и движений земной коры в широком частотном диапазоне – от высокочастотных колебаний до вековых движений. Аппаратура комплексных пунктов геодинимических наблюдений позволяет регистрировать колебания и смещения в диапазоне периодов начиная от 0,05 с и более. В дальнейшем регистрация сильнейшего землетрясения Тохоку 2011 г. и его афтершоков подтвердила правильность принятого подхода при создании ЕСГН ДВО РАН [4, 20].

Организация системы сбора, обработки и хранения геодезических и сейсмологических данных

В 2009 г. для централизованного сбора и обработки данных спутниковых измерений в ИПМ ДВО РАН был создан единый геодезический Информационно-аналитический центр (ИАЦ), оснащенный оборудованием и программными средствами для получения, хранения и обработки информации. Организация центра включала разработку, тестирование и введение в эксплуатацию специализированного программного обеспечения для автоматизированного сбора, накопления и систематизации данных ГНСС-наблюдений в пунктах сети Международной геодезической службы (IGS) и другой информации, необходимой для прецизионной математической обработки данных измерений, поступающих в центр из пунктов ЕСГН ДВО РАН. Кроме того, были разработаны методика и программное обеспечение для учета априорной информации о параметрах сезонных вариаций при оценке среднегодовых скоростей смещений ГНСС-пунктов с малым количеством наблюдений. Данный метод позволяет в ряде случаев существенно повысить точность и достоверность предварительных оценок скоростей смещений геодезических пунктов.

В 2011 г. на базе центра коллективного пользования «Центр данных ДВО РАН» (ВЦ ДВО РАН) было начато формирование второго центра данных ЕСГН ДВО РАН [22]. Для этого были проведены работы по синхронизации накопленной исходной инструментальной информации ЕСГН ДВО РАН и результатов ее обработки.

Начиная с 2012 г. вся измерительная информация поступает непосредственно в ВЦ ДВО РАН, а резервный архив ведется в ИАЦ ИПМ ДВО РАН. На регулярной основе в автоматическом режиме осуществляются сбор данных, их систематизация и специализированная обработка. Для этого используются авторские алгоритмы и пакеты прикладных программ сторонних разработчиков (BERNESE и др.).

Центр сбора сейсмологических данных был развернут в 2012 г. на базе ВЦ ДВО РАН при активном участии специалистов ИМГиГ ДВО РАН. На первом этапе были разработаны программные средства, обеспечивающие контроль качества передаваемой инструментальной информации и выявление технических сбоев при передаче данных. Следующим этапом стало создание универсальной программной платформы для управления ресурсами сетей геодинимических наблюдений ДВО РАН, специализированной обработки и анализа получаемых данных.

Функционирование компьютерной системы такого класса для работы с данными геодезических и сейсмологических наблюдений подразумевает необходимость комплексного решения задач по ведению архивов данных, организации информационного взаимодействия с международными центрами данных для проведения численных расчетов с использованием всей доступной инструментальной информации по исследуемой территории, анализа и визуализации полученных результатов. Реализация указанных требований была осуществлена через создание специализированных компьютерных модулей и их включение в качестве отдельных тематических блоков в единую программную платформу – АИС «Сигнал». Подробное описание разработанных систем представлено в [14, 19].

Результаты исследований

На основе данных длительного сейсмологического и геодезического мониторинга крупномасштабных деформаций на Дальнем Востоке в области взаимодействия Тихоокеанского и Центрально-Азиатского поясов и их обработки с применением созданных компьютерных систем получены весьма важные научные результаты.

1. Дана общая оценка вековых скоростей смещений земной коры юга Дальнего Востока России в глобальном, региональном и локальном масштабах и уровня современной геодинамической активности крупнейших тектонических структур Приморья и Хабаровского края (рис. 2) [21]. Юг континентальной части исследуемой территории (Приморский и Хабаровский края, Амурская область) характеризуется малыми (менее 5 мм/год) скоростями смещения станций северо-восточного и юго-восточного простираний относительно Евразии с незначительным доминированием восточной компоненты. Скорости и направления смещений ГНСС-пунктов, расположенных в пределах Приморского, Хабаровского краев и Сахалинской области, определенные относительно Евразийской плиты, позволяют сделать вывод о существовании между континентом и Сахалином границы скоростей. Смещения пунктов, расположенных на о-ве Сахалин, ориентированы в западном направлении, тогда как в скоростях континентальных ГНСС-пунктов доминирует восточная компонента (рис. 3). Этот результат соответствует субширотному сжатию западной части острова и бассейна Японского моря, что находит свое отражение в повышенной мелко- и среднефокусной сейсмичности. Анализ поля скоростей пунктов сети, расположенных в Приморском и Хабаровском краях, и проведенное моделирование показали незначительную современную геодинамическую активность Центрального Сихотэ-Алинского разлома.

2. Впервые на территории России инструментально зарегистрированы и оценены качественно и количественно горизонтальные косейсмические смещения земной коры, инициированные землетрясением Тохоку, произошедшим 11 марта 2011 г. ($M_w = 9,0$). Полученные данные применены для построения модели очага землетрясения и демонстрации

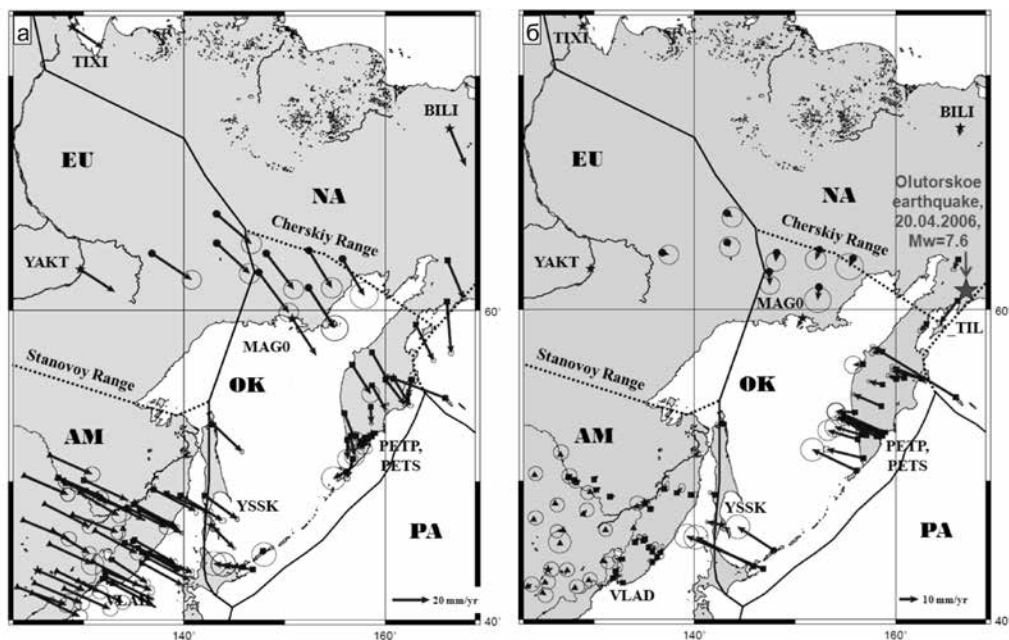


Рис. 2. Скорости смещения станций Дальнего Востока России в период наблюдений 1997–2009 гг. в системе координат ITRF2008 (а) и относительно Евразии (б). Тектонические плиты: Евразийская – EU, Североамериканская – NA, Тихоокеанская – PA, Амурская – AM, Охотская – OK

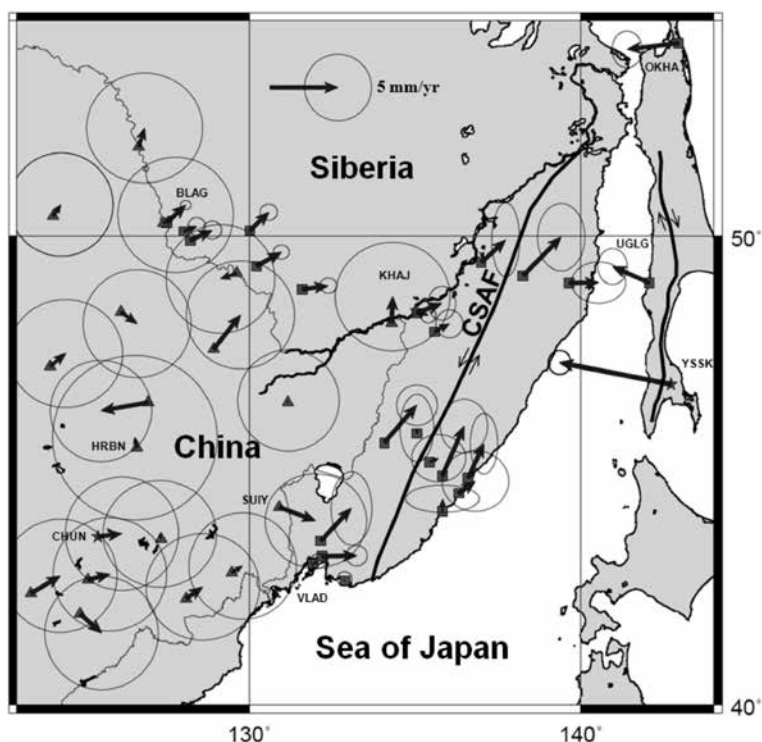


Рис. 3. Скорости смещения станций юга Дальнего Востока России в период наблюдений 1997–2009 гг. относительно Евразии (граница скоростей между континентом и о-вом Сахалин)

возможности их использования для создания системы краткосрочного предупреждения о цунами [4, 20].

На основе GPS/ГЛОНАСС-измерений рассчитаны горизонтальные косейсмические смещения на обширной территории Дальнего Востока на расстояниях до 2300 км от эпицентра землетрясения Тохоку (рис. 4). Установлено, что область самых интенсивных ко- и постсейсмических деформаций в дальней зоне с максимальными значениями соответственно 40 и 18 мм (первые месяцы после землетрясения) простирается на запад от о-ва Хонсю до Корейского полуострова, северо-востока Китая и юга Дальнего Востока России. Величины косейсмических смещений в континентальной части Дальнего Востока России достигали максимальных значений (около 4–5 см) на юге Приморья и уменьшались к северу от него (рис. 5). Косейсмические смещения земной поверхности также были зафиксированы пунктами Сахалино-Курильского участка ЕСГН ДВО РАН: максимальная величина смещения до 10 мм отмечена на станции KUNA (о-в Кунашир, г. Южно-Курильск).

Кроме того, впервые инструментально зарегистрированы и оценены количественно и качественно вертикальные постсейсмические движения земной коры, инициированные землетрясением Тохоку [3]. Современные вертикальные движения земной коры на юге Приморского края носят знакопеременный характер и зависят от геодинамических процессов в зоне субдукции, расположенной к востоку от Японских островов, что может служить долгосрочным предвестником катастрофических землетрясений в этой зоне. После землетрясения Тохоку по результатам непрерывных наблюдений с марта 2011 г. по январь 2014 г. обнаружены постсейсмические вертикальные движения в пределах нескольких миллиметров на расстояниях около 1000 км от эпицентра. Вертикального косейсмического скачка в момент землетрясения, в отличие от горизонтального, не обнаружено. Знак

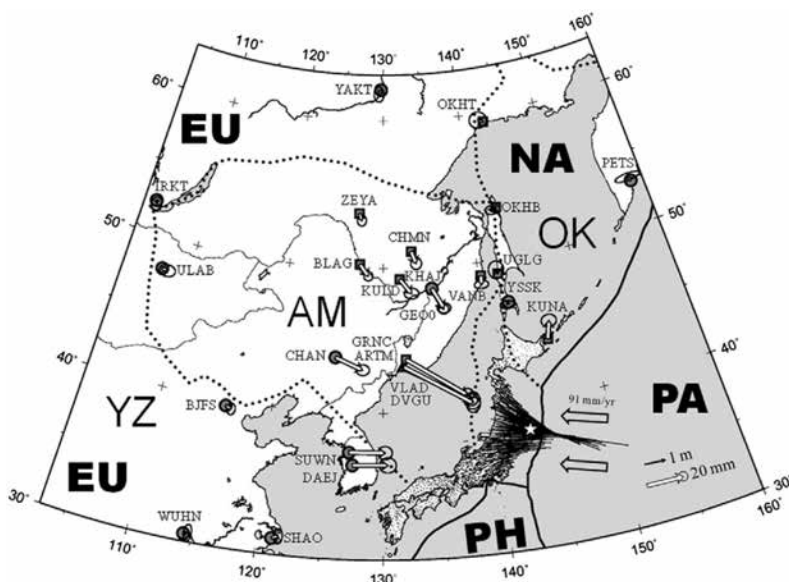


Рис. 4. Расположение GPS/ГЛОНАСС-пунктов непрерывной регистрации и наблюдаемые косейсмические смещения, вызванные землетрясением Тохоку. Эллипсы ошибок соответствуют 95 % вероятности. IGS-станции показаны серыми кружками, GPS-станции ДВО РАН – серыми квадратиками, станции ARTM и DVGU, обслуживаемые ДВФУ и ПриморАГП, – серыми треугольниками. Белая звезда – положение эпицентра землетрясения по данным JMA. Тектонические плиты: Евразийская – EU, Североамериканская – NA, Тихоокеанская – PA, Филиппинская – PH, Амурская – AM, Охотская – OK, Японцы – YZ. Границы главных плит обозначены сплошной черной линией, предполагаемых микроплит – точечной. Относительная скорость схождения PA/EU плит в районе землетрясения составляет 91 мм/год (вычислена согласно модели MORVEL-1A [17])

наклона земной поверхности после землетрясения изменился на обратный, что подтверждает взаимосвязь возможных вертикальных движений в дальней зоне и процессов в зоне субдукции.

Методом инверсии оценок косейсмических смещений GPS-пунктов в дальней зоне была построена дислокационная модель очага землетрясения Тохоку в виде плоскости разрыва размерами 200×96 км (угол простираия 207° , угол падения 15°) с равномерным смещением по ней величиной 33 м по направлению 105° . Сейсмический момент оценен величиной $1,9 \cdot 10^{22}$ Н·м. Показано, что главная часть сейсмического момента была реализована в разрыве относительно малого размера. Построенная модель объясняет косейсмические горизонтальные смещения как в дальней, так и в ближней зонах.

Исследования показали, что при использовании данных GPS-наблюдений в дальней зоне можно получать ценную информацию о поле смещений земной коры и оперативно с высокой точностью оценивать параметры удаленного землетрясения, что крайне важно для создания системы краткосрочного предупреждения о разрушительных цунами.

Проведен сравнительный анализ волновых форм землетрясения Тохоку, полученных сейсмологическим и геодезическим методами. Разработана методика получения ГНСС и сейсмических записей с одинаковыми амплитудно-частотными характеристиками, и на этой основе установлено хорошее согласие волновых форм землетрясения Тохоку, зафиксированных в пунктах Ванино (VANB), Горнотаежное (GRNB), Хабаровск (GEO0) ЕСТН ДВО РАН. Амплитуды и фазы колебаний в диапазоне частот от 0,004 до 0,1 Гц практически совпадают, их различие не превышает ошибки определения положения GPS/ГЛОНАСС-приемника. Это может служить основанием широкого применения ГНСС в сейсмологии,

а также при дальнейшем изучении совместного использования геодезических и сейсмических данных [10].

Недавно совместно с коллегами из Института прогнозирования землетрясений (КНР) было оценено влияние длительного деформирования, вызванного сильными землетрясениями в зоне субдукции Северо-Восточной Азии, на поле перемещений в дальней зоне. Исследование постсейсмических смещений, вызванных землетрясением Тохоку 2011 г., показало, что в течение 7 лет максимальное значение постсейсмических перемещений превысило 90 мм. Получены характеристики поля постсейсмических деформаций юга Дальнего Востока России и сопредельных территорий. На основе реологической модели Максвелла даны новые оценки вязкости астеносферы Япономорского региона – порядка $(1,5-2,3) \cdot 10^{18}$ Па·с [23].

3. Впервые методами спутниковой геодезии удалось зафиксировать и изучить распределение косейсмических смещений, вызванных мощным глубокофокусным сейсмическим событием – Охотоморским землетрясением ($M_w = 8,3$), произошедшим 24 мая 2013 г. [16]. Для получения косейсмических смещений земной коры использовались данные непрерывных ГНСС-наблюдений с шагом дискретизации 30 с в пунктах ЕСГН ДВО РАН, Камчатской GPS-сети ГС РАН, сети Международной GNSS службы (IGS) и самом северном пункте Японской национальной геодинамической сети GEONET – Wakkanai.

Максимальные величины горизонтальных подвижек достигают 15 мм (пункт MIL1), вертикальных смещений – 19 мм (станция АРСН) (рис. 6, а). Как видно из рисунка, уверенно регистрируемые ГНСС-методами горизонтальные косейсмические движения земной

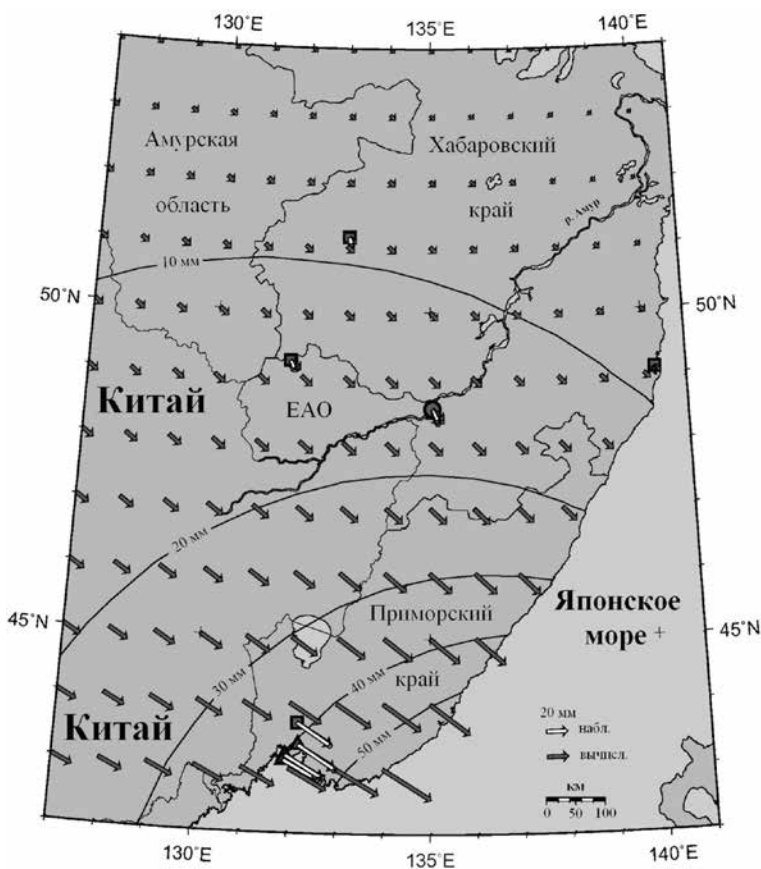


Рис. 5. Горизонтальные косейсмические смещения земной коры, инициированные землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г., вычисленные в узлах регулярной сетки с шагом $1^\circ \times 1^\circ$ (темные стрелки)

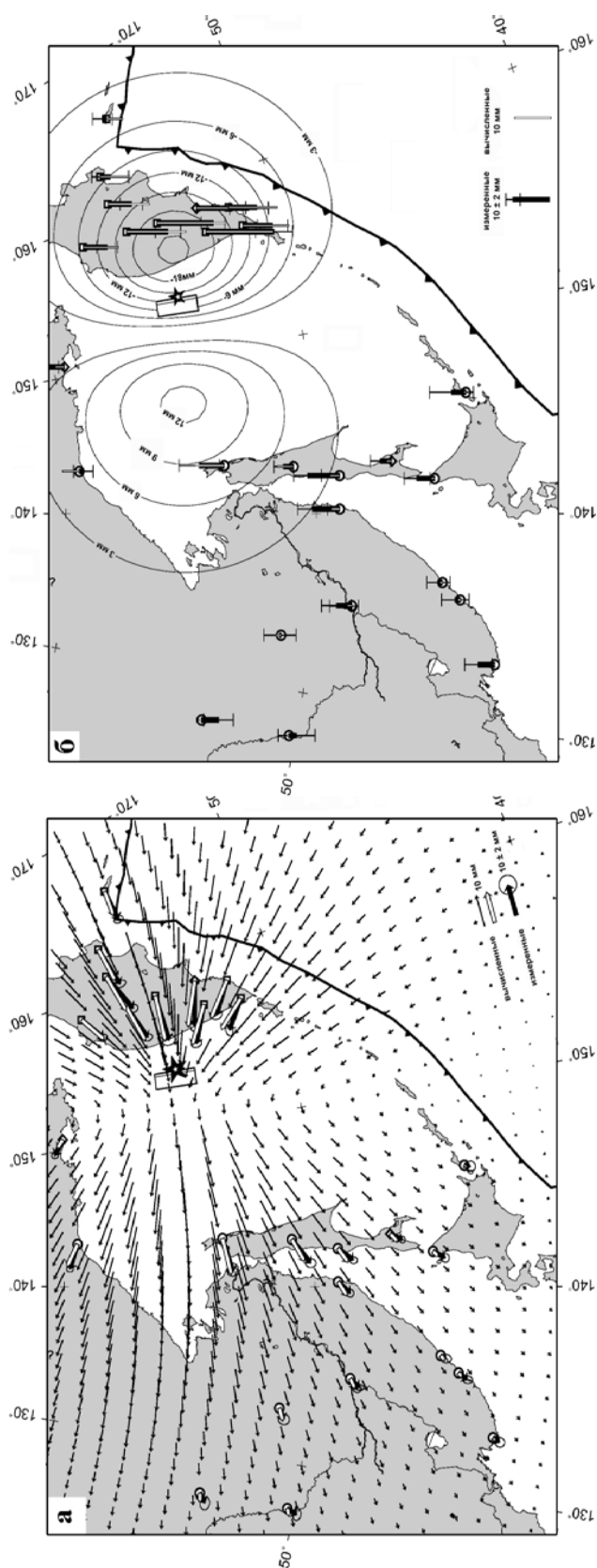


Рис. 6. Измеренные и вычисленные косейсмические смещения земной коры, инициированные глубоководным Охотоморским землетрясением 24.05.2013 г.
 а – величины и направления горизонтальных подвижек вместе с их 1- σ эллипсами ошибок; б – амплитуды вертикальных смещений (стойбики и изолинии). Изолинии показано поле вычисленных подвижек. Звездочкой обозначено положение эпицентра толчка $M_w = 8.3$. Прямоугольником изображена проекция модельной плоскости сейсморазрыва на поверхность Земли, верхний край плоскости отмечен двойной чертой

коры охватили практически все побережье Охотского моря, п-ов Камчатка, о-в Сахалин, побережье Татарского пролива. Вертикальные подвижки (рис. 6, б) наиболее выражены в данных на п-ове Камчатка (опускание) и северной половине о-ва Сахалин (поднятие).

Анализ временных рядов станций за несколько месяцев после Охотоморского землетрясения не выявил заметных постсейсмических смещений, что может быть объяснено как большой глубиной очага землетрясения, так и физическими свойствами Тихоокеанской литосферной плиты, в пределах которой локализован сейсморазрыв.

По данным о косейсмических смещениях в 27 пунктах наблюдений, расположенных на расстояниях 300–1100 км от эпицентра, и на основе имеющейся сейсмологической информации построена дислокационная модель очага Охотоморского землетрясения. Сейсморазрыв представлен единственной наклонной плоскостью с однородным смещением (механизм очага – сброс).

На рис. 6 показаны поля горизонтальных и вертикальных косейсмических смещений, рассчитанных с использованием оптимальной модели, соответствующей минимальным невязкам наблюденных и вычисленных смещений. Результаты моделирования удовлетворительно качественно и количественно объясняют наблюдаемые косейсмические смещения и накладывают ограничения на размеры очага землетрясения. Имеющиеся отклонения вычисленных и измеренных векторов подвижек могут быть объяснены прежде всего использованием упрощенной модели очага – наклонной плоскостью с однородным смещением – и выбранными физическими параметрами среды.

Таким образом, впервые на основе GPS/ГЛОНАСС-наблюдений определены фокальный механизм и сейсмический момент уникального сейсмического события – сильнейшего за всю историю инструментальной сейсмологии глубокофокусного Охотоморского землетрясения ($M_w = 8,3$), произошедшего 24 мая 2013 г. вблизи западного побережья Камчатки [16].

4. Рассмотрены различные модели схождения Североамериканской (Охотской) и Евразийской литосферных плит, граница которых представлена системой главных субмеридиональных разломов о-ва Сахалин. Для южной, центральной и северной частей островной суши получены первые оценки глубины зоны механического контакта (каплинга) литосферных плит, характеризующие сейсмический потенциал районов исследования [2].

Для анализа межсейсмических скоростей деформирования земной поверхности о-ва Сахалин использованы данные GPS/ГЛОНАСС-наблюдений в пунктах региональных геодинамических сетей и данные станций ЕСГН ДВО РАН, расположенных на острове. Межсейсмические скорости горизонтальных смещений земной поверхности о-ва Сахалин вычислены относительно Евразийской плиты (рис. 7). Скорости пунктов увеличиваются с запада на восток, достигая максимальных значений около 9 мм/год на юге, 6 мм/год – в центре и 5 мм/год – на севере острова. Векторы скоростей имеют субширотное направление, практически перпендикулярное плитовой границе.

Деформации земной поверхности северной части острова наилучшим образом согласуются с модельным решением для границы литосферных плит, проходящей по Северо-Сахалинскому разлому. Скорость схождения плит – 7,8 мм/год при глубине каплинга около 13 км. Методика вычисления глубины каплинга подробно представлена в [9]. Для центральной части о-ва Сахалин наиболее корректна модель в виде границы с двумя разломами – Центрально-Сахалинским и Западно-Сахалинским. Скорость схождения плит для этого района составляет 8,0 мм/год, глубина зоны механического контакта обоих разломов 30–40 км. На юге острова наилучшее согласование измеренных и модельных скоростей получено для границы плит, представленной двумя разломами – Центрально-Сахалинским и Западно-Сахалинским. Относительно Евразии скорость схождения плит составляет 10,2 мм/год при глубине каплинга ~20 км.

На основе межсейсмических скоростей выполнено моделирование деформированного состояния земной поверхности севера, центральной части и юга о-ва Сахалин. Преобладающим деформационным режимом является сжатие островной суши, однако

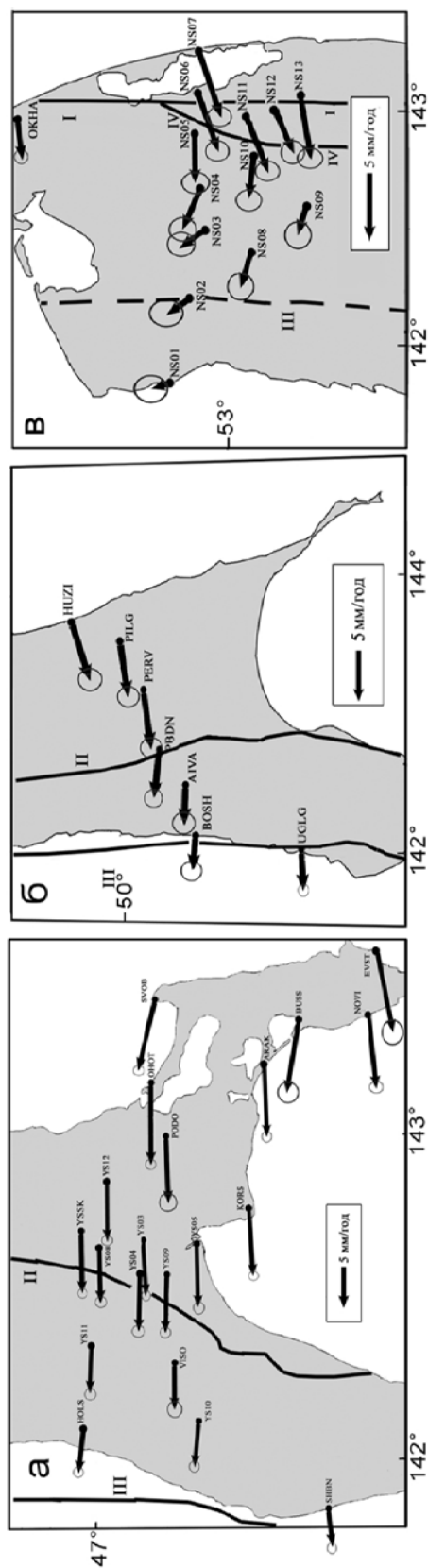


Рис. 7. Межсейсмические GPS-скорости горизонтальных деформаций земной поверхности о-ва Сахалин относительно Евразийской литосферной плиты. а – юг острова (период наблюдений 1999–2009 гг.); б – центральная часть острова (2003–2006 гг.); в – север острова (2000–2005 гг.). Разломы: I – Северо-Сахалинский, II – Центрально-Сахалинский, III – Западно-Сахалинский, IV – Верхнепильгунский, вскрывшийся в результате Нефтегорского землетрясения 1995 г. ($M_w = 7,0$)

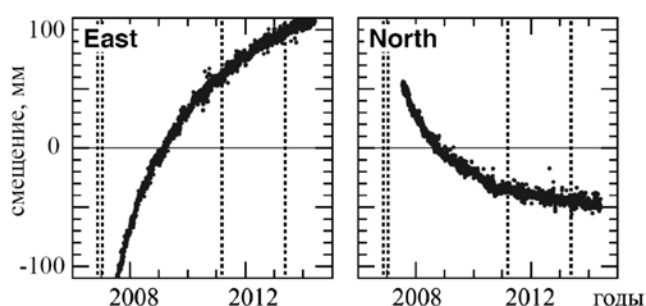
пространственное распределение деформаций неоднородно. Сокращение земной коры происходит в основном в субширотном, юго-западном и северо-восточном направлениях. Наряду со сжатием на севере и в центральной части острова выделяются области интенсивных деформаций правостороннего сдвига. Региональная геодинамическая обстановка находит отражение в сейсмичности острова: в районах интенсивного деформирования земной поверхности проявляется повышенная сейсмическая активность последних лет, тогда как области низких скоростей деформаций коррелируют с зонами слабой и разреженной сейсмичности [8].

Установлен характер современного каплинга Тихоокеанской и Охотской литосферных плит. В эпицентральной зоне дуплета Симуширских землетрясений 2006 г. ($M_w = 8,3$) и 2007 г. ($M_w = 8,1$) уже в течение нескольких лет идет затухающий процесс постсейсмической релаксации. Скорости релаксации в центральной части Курильской островной дуги, в отличие от севера и юга, направлены в сторону глубоководного желоба. Непосредственно после Симуширских землетрясений они достигали 10 см/год, а затем ежегодно уменьшались на 30 % [9]. В 2012 г. скорости релаксации снизились до 2,5 см/год (рис. 8), что соответствует продолжению изменения геометрии сцепления Тихоокеанской и Охотской литосферных плит и увеличению вязкости астеносферы в этом районе от 2×10^{17} Па·с в 2007 г. до 10^{18} Па·с в 2009 г. [18].

Установлено, что скорости постсейсмической релаксации направлены в сторону глубоководного желоба. Сцепление Тихоокеанской и Североамериканской (Охотской) литосферных плит отсутствует в центральной части дуги от о-ва Харимкотан до о-ва Уруп.

Результаты исследований дают уникальные инструментальные сведения о современной геодинамике Сахалино-Курильского региона.

Рис. 8. Графики среднесуточной повторяемости координат станции о-ва Кетой (Курильские острова) (см. рис. 1). Вертикальный пунктир – даты дуплета Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. ($M_w = 8,3$) и 13.01.2007 г. ($M_w = 8,1$), землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. ($M_w = 9,1$), Охотского глубокофокусного землетрясения 24.05.2013 г. ($M_w = 8,3$)



5. На основе инструментальных наблюдений ЕСГН ДВО РАН определен механизм очага Уангского землетрясения ($M_w = 5,8$), произошедшего 16 марта 2010 г. на северо-западе Сахалина в верховьях рек Уанга и Погиби (рис. 9). По данным макросейсмического обследования, землетрясение ощущалось на значительной части территорий Северного Сахалина и Приамурья. Анализ инструментальных данных позволил провести комплексное исследование сейсмического режима в эпицентральной зоне Уангского землетрясения: определить конфигурацию и размеры очаговой зоны, выявить особенности пространственно-временного формирования афтершоковой серии землетрясений, смоделировать поведение сейсмического процесса в очаговой зоне.

Установлено, что землетрясение с подвижкой взбросо-сдвигового типа произошло в условиях субширотного сжатия, что в целом хорошо согласуется с современными представлениями о характере деформирования в пределах Северного Сахалина. При основном толчке 16 марта 2010 г. разрыв в очаге произошел по плоскости, ориентированной субмеридионально, а вспарывание разрыва происходило с юга на север. Протяженность области афтершоков составила приблизительно 30 км [6].

6. Исследованы характер напряженного состояния и поле упругих напряжений в земной коре о-ва Сахалин на основе материалов, полученных по результатам определений механизмов очагов сильных землетрясений и их афтершоков [7]. Получены представительные данные о наиболее вероятном направлении подвижек в очагах сильных землетрясений с привязкой к активным геологическим структурам региона. Результаты последних исследований новейшей тектоники региона сопоставлены с характером и параметрами сейсмодислокаций сахалинских землетрясений.

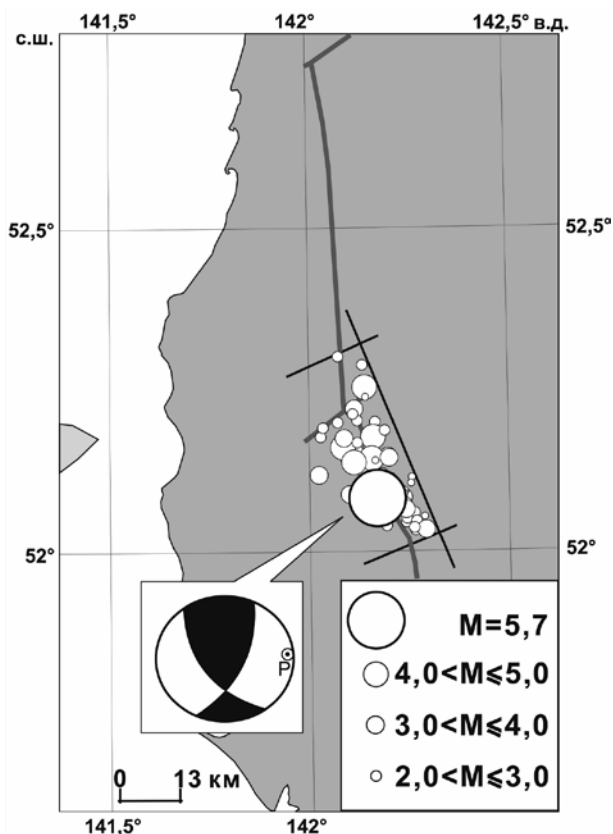


Рис. 9. Положение эпицентра главного толчка Уангского землетрясения 16.03.2010 г. ($M_w = 5,8$), облака афтершоков и сегмента разломной зоны. На врезке показан механизм очага землетрясения в нижней проекции фокальной полусферы

Изучение параметров сахалинских землетрясений и их сопоставление с пространственной структурой афтершокового режима позволили получить новые данные о механизмах возникновения землетрясений и кинематических характеристиках процесса вспарывания разрывов в широком диапазоне магнитуд. Для этого было проведено детальное исследование очаговых зон сильных сахалинских землетрясений, выполнено переопределение положения очагов землетрясений на современном уровне и проанализирована совокупность параметров сейсмодислокаций. Кроме того, осуществлена сеймотектоническая привязка очагов землетрясений к активным геологическим структурам региона.

На рис. 10 представлена уточненная сейсмогеологическая модель региона. Показано, что поле тектонических напряжений о-ва Сахалин воспроизводит главные особенности

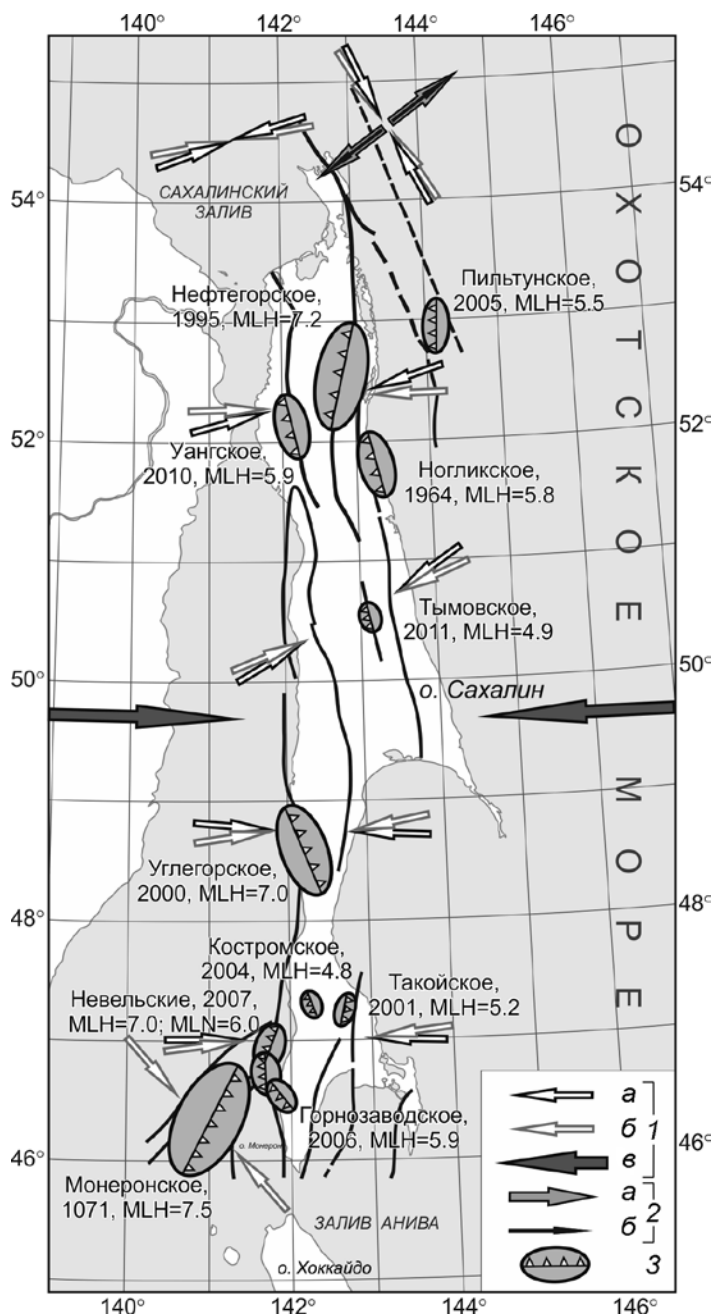


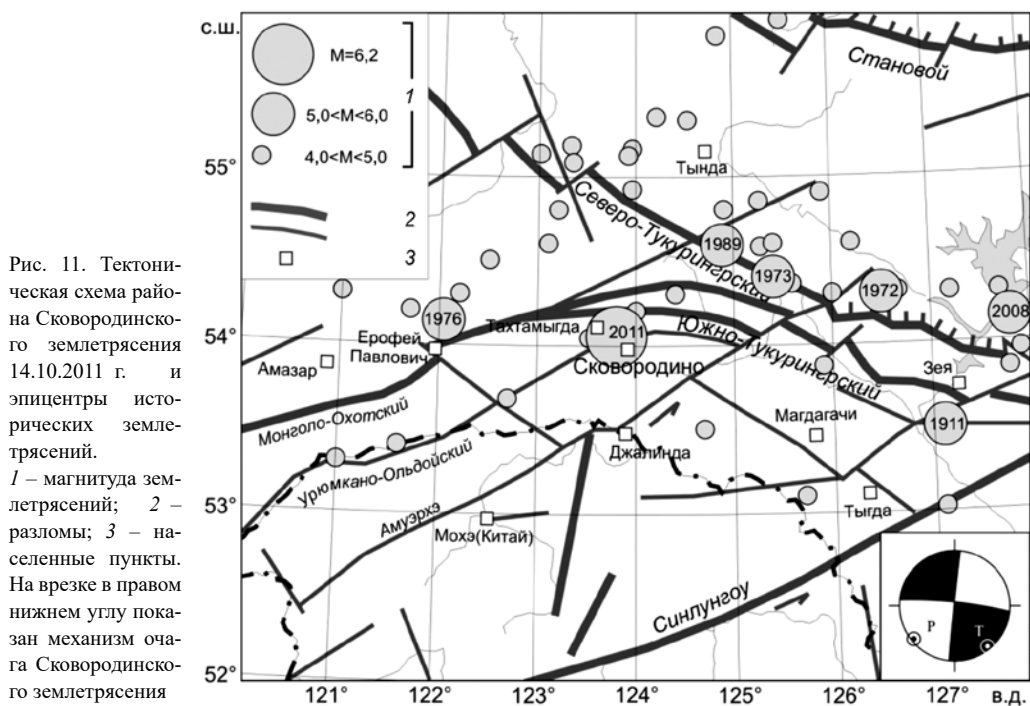
Рис. 10. Положение очаговых зон сильных землетрясений о-ва Сахалин относительно разломов различных кинематических типов и направлений регионального тензора напряжений сжатия и растяжения. 1 – оси сжатия: а – с учетом, б – без учета магнитуды, в – среднее значение напряжений сжатия региона в целом (без учета магнитуды); 2 – оси растяжения: а – с учетом, б – без учета магнитуды; 3 – очаговые зоны с рабочими плоскостями (берг-штрихами указаны направления падения плоскостей)

коровой сейсмичности. В частности, земная кора острова разделена на отдельные устойчивые в пространстве зоны с преобладанием в них субширотно либо диагонально ориентированных сжимающих напряжений. Отмечаются временные вариации поля напряжений за последние несколько сотен лет. В целом структура острова характеризуется субширотным сжатием, что согласуется с современными представлениями о процессе деформирования региона по данным геодезических наблюдений [2].

Полученные результаты имеют практическое значение при сейсмическом районировании и могут быть использованы в методике вероятностного анализа сейсмической опасности.

Необходимо заметить, что вследствие особенностей расположения сейсмической сети на о-ве Сахалин не всегда можно дать корректное определение всех очагов землетрясений. Тем не менее удалось составить максимально полный каталог механизмов очагов коровых землетрясений о-ва Сахалин за 1962–2011 гг. и механизмов афтершоков сильнейших событий. Параметры механизмов очагов были определены, проанализированы и представлены в современном унифицированном международном формате [7].

7. Выполнено комплексное исследование Сковородинского землетрясения ($M_w = 6,0$), произошедшего 14 октября 2011 г., – самого сильного сейсмического события за весь период инструментальных сейсмологических наблюдений в Верхнем Приамурье [15]. Определен механизм очага землетрясения по знакам первых вступлений. В качестве исходной информации использовались инструментальные данные ЕСГН ДВО РАН, глобальной сейсмографической сети IRIS, региональных сейсмологических сетей Сахалинского и Байкальского филиалов ГС РАН. Полученное решение описывает сдвиговый механизм с субвертикальными нодальными плоскостями, одна из которых ориентирована почти строго на запад, другая – на юг (рис. 11). Исходя из пространственного распределения афтершоков и тектоники региона следует, что механизм очага Сковородинского землетрясения – субширотный левосторонний сдвиг. Это совпадает с типом основных разломных нарушений региона и подтверждает продолжающиеся горизонтальные перемещения вдоль западного фланга Южно-Тукурингского разлома. Параметры землетрясения свидетельствуют о достаточно высоком сейсмическом потенциале территории ($M_w = 5,9–6,4$).



Получены новые данные о закономерностях затухания ощутимых сотрясений с расстоянием, что крайне важно для уточнения сейсмического районирования Верхнего Приамурья.

8. На основе каталога, включающего данные о 12 063 землетрясениях с гипоцентрами глубиной до 50 км, проведен анализ сейсмичности территории Приамурья и Приморья с 1865 по 2015 г. [12]. Распределение коровой сейсмичности территории имеет неравномерный характер. Наибольшее число землетрясений, в том числе самых сильных, тяготеет к трем сейсмическим поясам – Становому, Янкан-Тукурингра-Соктаханскому на восточном фланге Монголо-Охотского линеймента и Турано-Селемджинскому. Реконструкция параметров напряженного состояния земной коры региона осуществлена с использованием метода катакластического анализа механизмов очагов землетрясений [11]. Получены оценки направления осей региональных напряжений сжатия и растяжения для двух участков северной границы Амурской плиты и Алдано-Станового блока, разделенных зоной сейсмического затишья.

9. Многолетними геодезическими GPS/ГЛОНАСС-наблюдениями на территории Верхнего Приамурья установлено горизонтальное смещение большинства блоков региона в юго-западном направлении со средней скоростью 11 мм/год. Преобладающее левостороннее направление движения блоков совпадает с типом основных разломных нарушений региона и соответствует буферной зоне сейсмоактивных структур, северная граница которой проходит по Олекмо-Становому сейсмическому поясу, а южная – по Монголо-Охотскому разлому. Районы с максимальными значениями дивергенции пространственно совмещены с зонами повышенной сейсмичности, границами блоков и узлами пересечения разрывных нарушений. Из комплексного анализа геолого-геофизических данных и оценок скоростей смещения пунктов геодинимического полигона Верхнего Приамурья следует вывод о кинематической неоднородности Монголо-Охотского складчатого пояса на современном этапе и наличии сложной картины происходящих здесь деформаций. Характер тектонического режима в пределах Монголо-Охотского складчатого пояса позволяет соотнести его с буферной, или транзитной, зоной, в пределах которой реализуются тектонические напряжения, возникающие из-за различной кинематики окружающих его тектонических единиц [5].

Международное сотрудничество

Организация ЕСГН ДВО РАН и данные, полученные в ходе выполнения указанной выше программы, послужили основой полноценного партнерства и тесного сотрудничества с коллегами из Японии, Южной Кореи и Китая. В течение ряда лет исполнители программы активно участвуют в российско-японских проектах «Исследования сейсмотектоники Охотоморской плиты» (2005–2010 гг.) и «Геодинамика Дальнего Востока» (2010–2014 гг., 2015–2020 гг.), выполняемых институтами Российской академии наук и сообществом университетов Японии. В 2013–2015 гг. выполнен российско-японский проект РФФИ «Исследование вязкоупругих свойств структур под Японским морем и их взаимосвязи с современной тектоникой северо-восточной Азии по данным GPS-наблюдений» (13-05-92101 ЯФ).

Начиная с 2013 г. успешно развивается сотрудничество с Институтом прогноза землетрясений, входящим в структуру Сейсмологического бюро Китая (г. Пекин). Совместно с китайскими коллегами изучается современная геодинамическая активность северо-востока Китая и юго-востока России. В 2017–2018 гг. реализован совместный проект Российского фонда фундаментальных исследований и Государственного фонда естественных наук КНР «Современная тектоника и реологические свойства литосферы Северо-Восточной Азии (северо-восток Китая и юго-восток российского Дальнего Востока) по данным объединения наблюдений ГНСС-сетей Китая и России» (17-55-53110 ГФЕН_а).

Совместно с группой проф. Хироаки Такахаша (Hiroaki Takahashi) из Института сейсмологии и вулканологии Университета Хоккайдо (г. Саппоро, Япония) осуществляется поэтапная разработка систем раннего предупреждения о цунами в акватории Японского моря, в том числе с использованием созданной сети постоянно действующих ГНСС-пунктов ЕСГН ДВО РАН.

В рамках этих и других проектов проводились и проводятся исследования, направленные на оценку и уточнение сейсмической опасности, предупреждение природных катастроф – землетрясений, цунами и извержений вулканов.

Заключение

Организация ЕСГН ДВО РАН потребовала усилий нескольких десятков сотрудников из шести институтов. Общие затраты за первые 7 лет (2008–2014 гг.) превысили 50 млн руб. (приобретение оборудования, открытие новых пунктов наблюдения, эксплуатация сети, оплата каналов для передачи данных в режиме реального времени, обработка первичной информации), при этом ежегодное финансирование исследований из бюджета ДВО РАН составляло 1,5 млн руб.

В выполнении программы ежегодно было задействовано 25–30 сотрудников, до 75 % которых были молодые ученые, аспиранты и студенты. Работа молодых исследователей в таком коллективе способствовала эффективной подготовке квалифицированных кадров и быстрому профессиональному росту.

В настоящее время ЕСГН ДВО РАН включает 23 постоянных пункта GPS/ГЛОНАСС-наблюдений (система Trimble NetR5 и Фаза+), два из которых оснащены еще и современными цифровыми широкополосными сеймостанциями REF TEK SENS-BBS-120 (см. таблицу).

Проведенные в 2009–2019 гг. исследования позволили систематизировать и существенным образом дополнить геодинамические и геофизические характеристики литосферы Дальнего Востока и ее активных структур, данные о динамике деформационных и сейсмических процессов, разработать некоторые общие теоретические проблемы геодинамики. Эти исследования имеют не только чисто научную, но и практическую значимость, так как напрямую связаны с оценкой сейсмической опасности региона.

При выполнении исследований по ЦКП «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России (2009–2013 гг.)», Комплексной программе фундаментальных научных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» и проекту «Современная геодинамика Дальнего Востока России: мониторинг, моделирование, прогнозирование» (18-5-024) в рамках программы фундаментальных исследований РАН «Приоритетные научные исследования в интересах комплексного развития Дальневосточного отделения РАН» (2018–2020 гг.) проведены сбор, передача, хранение и обработка данных спутниковых и сейсмологических измерений с целью получения новых количественных оценок скоростей смещения земной поверхности и сейсмической активности Дальнего Востока для исследования современной геодинамики региона и построения моделей взаимодействия литосферных плит.

На основе анализа данных длительного сейсмологического и геодезического мониторинга крупномасштабных деформаций на Дальнем Востоке получены значительные научные результаты.

1. Дана общая оценка вековых скоростей смещений земной коры юга Дальнего Востока России в глобальном, региональном и локальном масштабах, оценен уровень современной геодинамической активности крупнейших тектонических структур.

2. Впервые инструментально зарегистрированы горизонтальные косейсмические смещения земной коры на территории России, инициированные землетрясением Тохоку ($M_w = 9,0$), произошедшим 11 марта 2011 г., построена модель очага землетрясения. На основе GPS/ГЛОНАСС-измерений рассчитаны косейсмические смещения на обширной

**Местоположение GPS/ГЛОНАСС-станций (система Trimble NetR5 и Фаза+)
и сейсмических станций REF TEK SENS-BBS-120**

№ п/п	Населенный пункт	Название станции	Координаты, град.		Дата ввода в эксплуатацию	Институт, ответственный за эксплуатацию
			Широта	Долгота		
1	Тымовское	TYMV	50.859	142.671	25.07.2009	ИМГиГ
2	Оха	OKHB	53.601	142.941	30.07.2009	ИМГиГ
3	Углегорск	UGLG	49.068	142.059	10.08.2009	ИМГиГ
4	О-в Монерон	MONR	46.245	141.258	08.07.2011	ИМГиГ
5	Южно-Курильск	KUNA	44.035	145.861	22.10.2010	ИМГиГ
6	Курильск	ITRP	44.216	147.866	27.07.2017	ИМГиГ
7	Терней	TERN	45.037	136.603	19.10.2008	ИПМ
8	Горнотажное	GRNC	43.698	132.165	11.06.2009	ИПМ
9	Охотск	OKHT	59.418	143.071	22.09.2009	ИТиГ
10	Хабаровск	GEO0	48.473	135.052	01.09.2009	ИТиГ
11	Ванино	VANB, VNNR*	49.091	140.255	27.08.2008, 16.09.2008	ИТиГ
12	Кульдур	KULD	49.333	131.100	01.08.2008	ИТиГ
13	Чегдомын	CHMN, CHMR*	51.137	133.040	26.09.2009	ИТиГ
14	Зея	ZEYA	53.750	127.280	08.08.2012	ИГиП
15	Благовещенск	BLAG	49.407	127.480	27.08.2010	ИГиП
16	Хабаровск	KHAB	48.488	135.077	05.09.2011	ИТиГ
17	Ерофей Павлович	EROF	53.960	121.950	21.08.2011	ИГиП
18	Тында	TIND	55.160	124.750	21.08.2012	ИГиП
19	Заповедное	ZAPV	42.837	133.693	04.10.2015	ИПМ, ДВФУ
20	Смычка	SMHK	44.346	135.818	01.01.2013	ИПМ
21	Дальнереченск	IMAN	45.934	133.735	27.03.2014	ИПМ
22	Лузановская сопка	LUZS	44.552	132.381	15.10.2017	ИПМ, ДВФУ
23	Владивосток	VLAD	43.197	131.926	12.02.1996	ИПМ

* Пункты, оборудованные широкополосными сейсмостанциями REF TEK SENS-BBS-120.

территории Дальнего Востока на расстояниях до 2300 км от эпицентра землетрясения Тохоку. Вертикального косейсмического скачка, в отличие от горизонтального, в момент землетрясения не обнаружено, но впервые инструментально зарегистрированы и оценены количественно и качественно вертикальные постсейсмические движения земной коры.

3. Впервые в мировой практике на основе GPS/ГЛОНАСС-наблюдений установлены величины косейсмических смещений земной коры, построена дислокационная модель очага и получен сейсмический момент уникального сейсмического события – сильнейшего за всю историю инструментальной сейсмологии глубокофокусного Охотоморского землетрясения ($M_w = 8,3$), произошедшего 24 мая 2013 г. вблизи западного побережья п-ова Камчатка на глубине ~600 км.

4. На основе измерений межсейсмических горизонтальных скоростей земной поверхности о-ва Сахалин за период 1999–2009 гг. построены различные модели схождения Североамериканской (Охотской) и Евразийской литосферных плит, граница которых представлена системой главных субмеридиональных разломов острова. Для южной, центральной и северной частей островной суши получены первые оценки глубины зоны механического контакта литосферных плит, характеризующие сейсмический потенциал районов исследований.

5. Впервые для Сахалинского региона выполнен статистический анализ параметров сейсмодислокаций и построена уточненная сейсмотектоническая модель, которую рекомендовано использовать при решении задач сейсмического районирования и количественных оценок сейсмической опасности региона.

6. Проведено комплексное исследование Сковородинского землетрясения ($M_w = 6,0$), произошедшего 14 октября 2011 г., – самого сильного сейсмического события за весь период инструментальных сейсмологических наблюдений в Верхнем Приамурье. Определен механизм очага землетрясения по знакам первых вступлений. Полученное решение описывает сдвиговый механизм с субвертикальными нодальными плоскостями, что соответствует типу основных разломных нарушений в регионе и подтверждает продолжающиеся горизонтальные перемещения вдоль западного фланга Южно-Тукурингского разлома.

7. Выполнено массовое определение фокальных механизмов землетрясений, произошедших в 2005–2009 гг. в районе о-ва Сахалин, Курильских островов, акватории Охотского моря, Татарского пролива и северной части Японского моря. Сравнение механизмов очагов землетрясений, определенных в ходе исследований, с вариантами решений мировых сейсмологических агентств USGS и GCMT показало хорошее совпадение.

8. На основе объединенного поля скоростей движений земной коры на территории Амурской плиты и ее окраин построено непрерывное поле скоростей деформаций. Рассчитаны скорости дилатации, направления и значения главных осей деформации. Количественно оценены скорости максимальных сдвиговых деформаций и направления их осей. Выявленные зоны повышенной тектонической активизации соответствуют областям редуцированной литосферы и часто характеризуются наличием позднекайнозойского вулканизма.

9. Разработана информационная система для автоматизированной обработки инструментальных данных и проведения на их основе исследований современных геодинамических процессов на территории юга Дальнего Востока России и Северо-Восточной Азии.

Авторы благодарны д.ф.-м.н. В.Ю. Тимофееву за полезные советы и конструктивные замечания по рукописи статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Герасименко М.Д., Шестаков Н.В., Коломиец А.Г., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Серов М.А., Селиверстов Н.И., Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дучков А.Д., Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Ардюков Д.Г. Начало формирования единой сети геодинамических наблюдений ДВО РАН // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 4. С. 83–93.
2. Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 42–48.
3. Герасименко М.Д., Шестаков Н.В., Коломиец А.Г., Герасимов Г.Н., Такахаси Х., Сысоев Д.В., Нечаев Г.В. Вертикальные движения юга Приморского края и их связь с геодинамическими процессами в зоне субдукции // Геод. и картография. 2016. № 3. С. 33–37.
4. Диденко А.Н., Быков В.Г., Шестаков Н.В., Бормотов В.А., Герасименко М.Д., Коломиец А.Г., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Сорокин А.А. Землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г. Данные сети деформационных и сейсмологических наблюдений ДВО РАН // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 3. С. 18–24.
5. Жижерин В.С., Серов М.А. Кинематика современных тектонических движений в пределах восточной части Монголо-Охотского складчатого пояса // Геол. и геофизика. 2016. Т. 57, № 12. С. 2143–2152.
6. Коновалов А.В., Семенова Е.П., Сафонов Д.А. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16 марта 2010 года ($M_w = 5,8$) на северо-западе о. Сахалин // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 37–49.
7. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с.
8. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Деформации земной поверхности о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 2. С. 503–514.

9. Прытков А.С., Грецкий Н.В., Василенко Н.Ф. Современная глубина межплитового сцепления в Сахалино-Курильском регионе по данным GPS наблюдений // Вестн. ДВО РАН. 2012. № 3. С. 21–27.
10. Пупатенко В.В. Сравнительный анализ волновых форм землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г., полученных сейсмологическим и геодезическим методами // Вестн. ДВО РАН. 2014. № 5. С. 132–138.
11. Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // ДАН. 1999. Т. 365, № 3. С. 392–395.
12. Сафонов Д.А. Сейсмическая активность Приамурья и Приморья // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2, № 2. С. 104–115.
13. Сорокин А.А., Королев С.П., Михайлов К.В., Коновалов А.В. Автоматизированная информационная система оценки состояния сети инструментальных сейсмологических наблюдений «Сигнал-С» // Информатика и системы управления. 2010. № 4 (26). С. 161–167.
14. Сорокин А.А., Королев С.П., Шестаков Н.В., Мальковский С.И., Цой Г.И., Пупатенко В.В. Организация работы с данными глобальных навигационных спутниковых систем для комплексного исследования современных геодинамических процессов на юге Дальнего Востока России // Совр. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 158–172.
15. Ханчук А.И., Сафонов Д.А., Радзиминович Я.Б., Коваленко Н.С., Коновалов А.В., Шестаков Н.В., Быков В.Г., Серов М.А., Сорокин А.А. Сильнейшее современное землетрясение в Верхнем Приамурье 14 октября 2011 г.: первые результаты комплексного исследования // ДАН. 2012. Т. 445, № 3. С. 338–341.
16. Шестаков Н.В., Охзоно М., Такахаша Х., Герасименко М.Д., Быков В.Г., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Титков Н.Н., Серовников С.С., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Сорокин А.А., Серов М.А., Кондратьев М.Н., Пупатенко В.В. Моделирование косейсмических движений земной коры, инициированных глубокофокусным Охотоморским землетрясением 24.05.2013 г., $M_w = 8,3$ // ДАН. 2014. Т. 457, № 4. С. 471–476.
17. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F. Geologically current plate motions // Geophys. J. Intern. 2010. Vol. 181, N 1. P. 1–80.
18. Kogan M.G., Vasilenko N.F., Frolov D.I., Freymueller J.T., Steblov G.M., Prytkov A.S., Ekstrom G. Rapid postseismic relaxation after the great 2006–2007 Kuril earthquakes from GPS observations in 2007–2011 // J. Geophys. Res. 2013. Vol. 118. P. 1–16.
19. Korolev S.P., Sorokin A.A., Verkhoturov A.L., Kononov A.V., Shestakov N.V. Automated information system for instrument-data processing of the regional seismic observation network of FEB RAS // Seismic Instruments. 2015. Vol. 51, N 3. P. 209–218.
20. Shestakov N., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A., Bykov V., Gerasimenko M., Luneva M., Gerasimov G., Kolomiets A., Bormotov V., Vasilenko N., Baek J., Park P.-H., Serov M. Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations // Tectonophysics. 2012. Vol. 524 / 525. P. 76–86.
21. Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Takahashi H., Kasahara M., Bormotov V.A., Bykov V.G., Kolomiets A.G., Gerasimov G.N., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Kato T. Present tectonics of the south-east of Russia as seen from GPS observations // Geophys. J. Intern. 2011. Vol. 184, N 2. P. 529–544.
22. Sorokin A.A., Makogonov S.I., Korolev S.P. The information infrastructure for collective scientific work in the Far East of Russia // Sci. Techn. Inform. Proc. 2017. Vol. 4. P. 302–304.
23. Zhao Q., Fu G., Wu W., Liu T., Su L., Su X., Shestakov N.V. Spatial-temporal evolution and corresponding mechanism of the far-field post-seismic displacements following the 2011 $M_w = 9,0$ Tohoku earthquake // Geophys. J. Intern. 2018. Vol. 214, N 3. P. 1774–1782.