

УДК 550.8.05, 551.24

Геодинамический мониторинг в ФИЦ ЕГС РАН: современное состояние и перспективы развития

© 2022 г. Ю.В. Габсатаров, И.С. Владимирова, И.А. Сдельникова

ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

Поступила в редакцию 05.09.2022 г.

Аннотация. Современные тенденции проведения исследований в науках о Земле состоят во всё более широком применении результатов численного моделирования с использованием больших объёмов прямых измерений смещений земной поверхности. Существенное повышение точности, детальности и масштаба измерений современных движений земной поверхности в последние десятилетия основано на активном развитии методов космической и, в частности, спутниковой геодезии, а также на установке плотных сетей станций наблюдений. ФИЦ ЕГС РАН является одним из пионеров развития геодинамического мониторинга на основе спутниковой геодезии на территории РФ. Необходимость поддержания лидерских позиций ФИЦ ЕГС РАН в области геодинамического мониторинга обуславливает актуальность задачи разработки современных методов проведения спутниковых геодезических измерений в условиях лимитированных ресурсов и необходимости разработки импортозамещающих технологий. В работе рассматривается существующий научно-методологический задел, созданный в секторе геодинамического мониторинга ФИЦ ЕГС РАН, и формулируются перспективные направления развития подсистемы геодинамического мониторинга.

Ключевые слова: спутниковая геодезия, геодинамический мониторинг, современные движения земной коры, математическое моделирование, деформационные процессы, землетрясения, цунами.

Для цитирования: Габсатаров Ю.В., Владимирова И.С., Сдельникова И.А. Геодинамический мониторинг в ФИЦ ЕГС РАН: современное состояние и перспективы развития // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 7–23. DOI: 10.35540/2686-7907.2022.4.01. – EDN: MNBLYM.

Введение

Спутниковые геодезические изыскания, проводимые с 80-х гг. XX в., показали, что земная поверхность находится в постоянном движении [Мазуров, 2020]. Современные движения земной коры (СДЗК) вызваны действием различных геодинамических процессов, возникающих как следствие эволюции планеты Земля и взаимодействия её оболочек. Пространственно-временной масштаб и интенсивность проявления геодинамических процессов крайне различны от локального до планетарного масштаба, от секунд до миллионов лет и от слабо различимых (миллиметры и доли миллиметра) до существенно меняющих рельеф земной поверхности.

Обширная территория Российской Федерации включает в себя как стабильные сегменты литосферных плит, так и пограничные зоны их взаимодействия различного типа: конвер-

гентные на Кавказе и вдоль Курило-Камчатской островной дуги, дивергентные в Арктическом регионе, обширные зоны распределённых деформаций в Северо-Восточной Азии. Эти геодинамические особенности обуславливают значительные различия сейсмической и тектонической активности территории РФ от практически стабильных и асейсмичных областей до высоко активных сейсмически, вулканически и цунамиопасных регионов. В тектонически активных регионах РФ решение задачи прогнозирования опасных геодинамических процессов, таких как оползни, землетрясения и вулканические извержения, возникновение волн цунами, имеет важнейшее значение для обеспечения безопасности населения и объектов промышленности и инфраструктуры. Решение этой задачи связано с построением точных структурно-динамических моделей тектонически активных регионов, что практически невозможно без использования

большого количества данных о СДЗК. В связи с этим, проведение непрерывного геодезического мониторинга СДЗК на территории Российской Федерации является актуальной задачей.

В настоящее время геодезические методы являются основными при изучении современных движений и деформаций земной поверхности [Хаин, 1979]. Одним из наиболее современных геодезических методов является использование данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Мировой и отечественный опыт последних трёх десятилетий показывает высокую разрешающую способность таких наблюдений для выявления смещений земной поверхности, обусловленных различными факторами как тектонического, так и техногенного происхождения. Точность измерений СДЗК с помощью организации наблюдений на постоянных станциях ГНСС достигает в настоящее время миллиметрового уровня, что достаточно для наблюдения любых геодезических процессов, интенсивность которых превосходит несколько миллиметров в год (рис. 1). Анализ таких данных является в настоящее время одним из наиболее широко используемых методов изучения деформационных процессов, протекающих в земной коре и литосфере [Саньков, 2014]. Дополнительными факторами, способствующими активному развитию сетей станций ГНСС-наблюдений, являются всепогодность системы, относительная дешевизна оборудования, а также относительная простота установки и эксплуатации наземного оборудования.

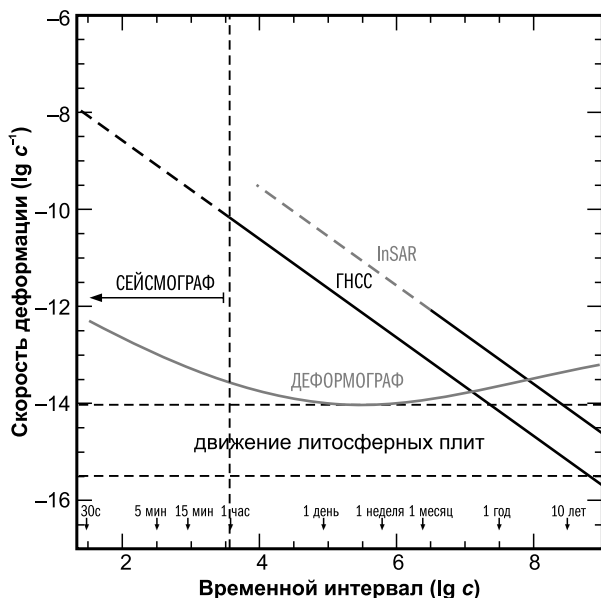


Рис. 1. Чувствительность различных приборов для измерения деформаций земной поверхности по данным [Nikolaidis, 2002]

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) является одним из пионеров использования данных ГНСС-наблюдений для мониторинга СДЗК на территории Российской Федерации и в Северной Евразии. Сеть геодезического мониторинга ФИЦ ЕГС РАН обеспечивает существование регионального сегмента мировой сети Международной службы ГНСС (IGS), что позволяет реализовать отсчётную основу для региональных геодезических полигонов и организовать изучение геодезических процессов в тектонически активных регионах РФ, в том числе Дальневосточном и Северо-Кавказском, в единой Международной земной отсчётной основе (ITRF). Кроме того, совместное расположение станций геодезических наблюдений и сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН открывает широкие возможности для комплексирования результатов наблюдений деформаций земной поверхности различными методами.

Целью настоящей работы является обобщение опыта и технологий, полученных при развитии методов постобработки и интерпретации ГНСС-данных в секторе геодезического мониторинга ФИЦ ЕГС РАН, для разработки перспективных направлений развития системы геодезического мониторинга ФИЦ ЕГС РАН.

Сеть станций ГНСС-наблюдений ФИЦ ЕГС РАН

Активное развитие сетей станций ГНСС-наблюдений в Северной Евразии в начале 90-х гг. XX в. в основном сосредоточилось в странах Западной Европы. До 1997 г. на обширной территории РФ практически не проводилось постоянных спутниковых геодезических наблюдений, что ухудшало реализацию ITRF и оценки эфемерид спутников ГНСС, а также создавало большие сложности при моделировании динамики Северо-Восточной Азии, в том числе Сибирского и Дальневосточного регионов РФ. С 1997 по 2000 г. на территории РФ в рамках совместного российско-американского проекта RUSEG [Kogan et al., 1996] была развернута сеть станций постоянных ГНСС-наблюдений NEDA (North Eurasia Deformation Array). Сеть NEDA была создана в рамках тесной кооперации ФИЦ ЕГС РАН, Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Обсерватории наук о Земле Ламонт-Доэрти Колумбийского университета (LDEO), IGS, Национального управления по авиации и исследованию

космического пространства (NASA) и Массачусетского технологического института (MIT). Проект установки станций сети NEDA разрабатывался с учётом нескольких основных требований: 1 – сеть станций должна покрывать всю территорию Северной Евразии от Восточноевропейской платформы до Чукотки, Камчатки и Сахалина; 2 – станции должны устанавливаться на расстоянии не более 1500 км друг от друга, что связано с особенностями технологии постобработки спутниковых измерений; 3 – станции должны устанавливаться вблизи иных пунктов наблюдений геофизических полей для обеспечения возможности комплексирования результатов наблюдений. Первоначально все станции ГНСС-наблюдений комплектовались

однотипным оборудованием в составе 12-канального приёмника GPS-наблюдений Ashtech Z-XII и антенны Ashtech с системой подавления многолучёвости, реализованной набором натуральных концентрических колец (Choke Ring) (рис. 2а). Часть станций была также оборудована метеорологическими датчиками Paroscientific MET3, соединёнными с ГНСС-приёмниками (рис. 2б). В 2018–2020 гг. было проведено обновление оборудования на пяти станциях сети NEDA с заменой устаревших GPS-приёмников на современные 216- и 864-канальные мультисистемные ГНСС-приёмники Javad Delta и Javad Delta-3, что существенно расширило возможности сети NEDA по регистрации сигналов системы ГЛОНАСС.

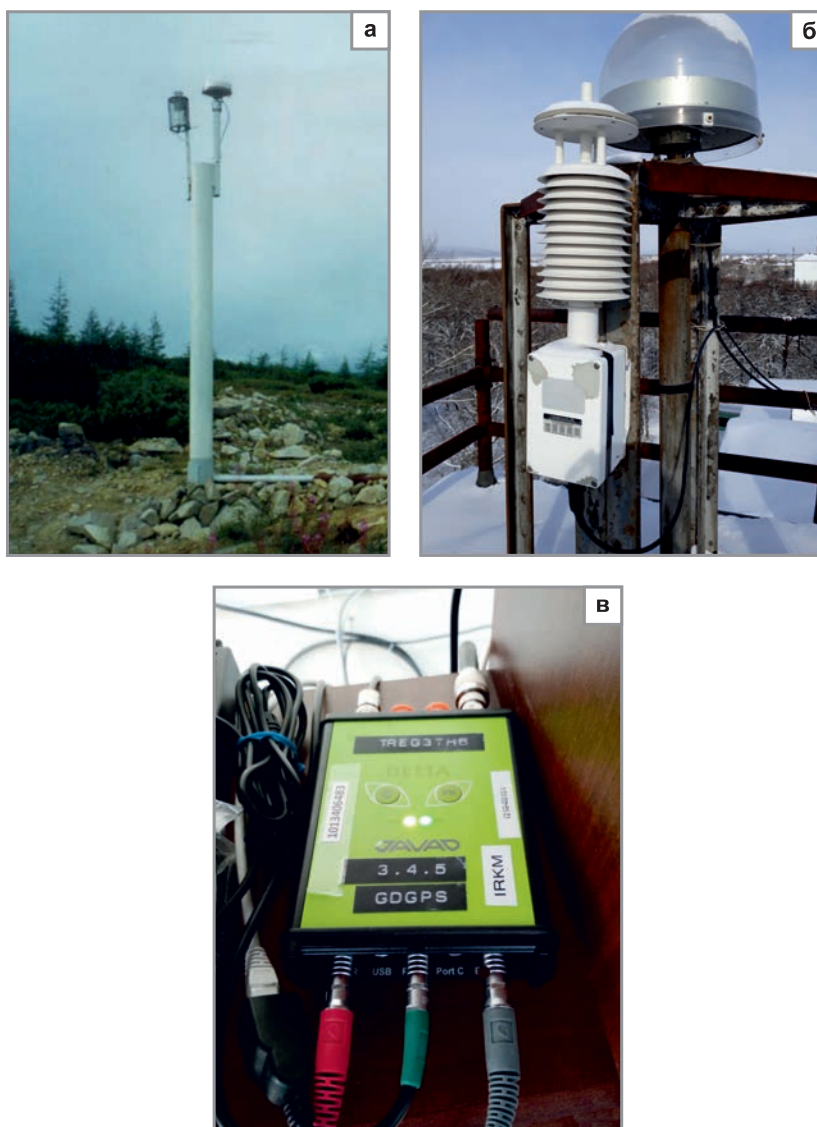


Рис. 2. Спутниковое геодезическое оборудование станций сети NEDA:

- а – монтаж антенны приёма ГНСС-сигналов и метеодатчика на пилоне на станции MAG0 (г. Магадан);
- б – монтаж антенны на крыше здания на станции YSSK (г. Южно-Сахалинск);
- в – внешний вид современного мультисистемного ГНСС-приёмника Javad Delta

Все станции NEDA были зарегистрированы как опорные станции мировой сети IGS, что означает ежедневную обработку данных сети в трёх мировых центрах обработки IGS и использование результатов обработки при расчёте эфемерид спутников ГНСС и создании реализаций отсчётной основы ITRF. Спутниковые геодезические измерения со станций NEDA в аппаратных форматах приёмников автоматизировано собираются и поступают в Центр сбора и архивирования данных в г. Обнинске, где конвертируются в стандартный формат RINEX [Gurtner, 1994], копируются в архив измерений, а затем передаются в мировые центры данных IGS. Первоначально передача данных со станций NEDA была организована с задержкой около 1 часа. В настоящее время в составе сети NEDA функционируют 11 опорных станций постоянного наблюдения (рис. 3), передающих данные в режиме, близком к реальному времени.

В июле 2007 г. для технической и методологической поддержки проведения геодинимических наблюдений в Центральном отделении (ЦО) ФИЦ ЕГС РАН был организован сектор геодинимического мониторинга (ГМ) под руководством д.ф.-м.н., профессора РАН Г.М. Стеблова. Позднее в том же году во исполнение распоряжения Президиума РАН № 10103-815 от 17 октя-

бря 2007 г. на базе сектора ГМ создан центр сбор обработки и анализа данных GPS/ГЛОНАСС-наблюдений (ЦГН ФИЦ ЕГС РАН). Основными задачами сектора ГМ и ЦГН являются:

1 – разработка и реализация концепции геодинимического мониторинга на основе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS/ГЛОНАСС;

2 – создание и развитие единой системы высокоточных геодинимических наблюдений, а также их интерпретации на базе станций ГНСС-наблюдений ФИЦ ЕГС РАН и других организаций и ведомств;

3 – анализ работы региональных геодинимических полигонов и выработка рекомендаций по их созданию и совершенствованию;

4 – интеграция опорной континентальной сети GPS/ГЛОНАСС-наблюдений ФИЦ ЕГС РАН в мировую сеть IGS;

5 – исследование деформаций и сейсмических смещений земной поверхности, опорных точек общественно и производственно значимых объектов в районах высокой тектонической активности, районах интенсивной разработки полезных ископаемых и других районах активного воздействия на окружающую среду.

В настоящее время сотрудники сектора ГМ участвуют в совместных научных и технических



Рис. 3. Расположение станций опорной сети геодинимических наблюдений и региональных геодинимических полигонов ФИЦ ЕГС РАН

программах с рядом российских учреждений: ИФЗ РАН, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), Московский физико-технический институт (МФТИ), АО «Российские космические системы» (РКС), ФГБУ «Центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» (ЦГКИ-ИПД), ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ), ООО «НПП ГеоПрофи», а также с различными зарубежными научными центрами.

Работа сети опорных станций ФИЦ ЕГС РАН играет важную роль в решении задач крупномасштабной геодинамики, моделирования деформационных процессов, изучения ионосферы и тропосферы. Одной из важнейших задач опорной сети ФИЦ ЕГС РАН является также обеспечение отсчётной основы для региональных геодинамических полигонов, развёрнутых в тектонически активных областях с целью сгущения наблюдательной сети.

Камчатский геодинамический полигон

Развитие постоянных геодинамических наблюдений на Камчатке началось с установки в 1997 г. опорной станции сети NEDA в Петропавловске-Камчатском. В дальнейшем на территории п-ова Камчатка, с целью создания сети опорных точек для региональных проектов по изучению вулканических и деформационных процессов, специалистами Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН) и Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) был развёрнут геодинамический полигон KAMNET в составе девяти пунктов постоянных ГНСС-наблюдений [Gordeev et al., 2001].

В настоящее время в состав KAMNET входят 28 пунктов спутниковых геодезических наблюдений, служащих опорой для организации локальных полигонов изучения вулканических процессов и процессов деформирования континентальной окраины [Steblov et al., 2003; Levin et al., 2014].

Курильский геодинамический полигон

Спутниково-геодезические измерения в Охотоморском регионе начались с установки в 1995–1997 г. трёх станций постоянного наблюдения в Южно-Сахалинске, Углегорске и Охе [Takahashi et al., 1999]. В дальнейшем, с целью детального изучения динамики предполагаемой погранич-

ной зоны между Евразийской и Североамериканской литосферными плитами, на о. Сахалин были проведены повторные измерения на пунктах периодических наблюдений [Kogan et al., 2003]. В настоящее время эти работы продолжают сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН [Прытков, Василенко, 2018; Василенко, Прытков, 2019].

В 2006–2008 гг. в рамках трёх этапов совместной российско-японско-американской комплексной экспедиции на Курильские острова геодезическим отрядом ИМГиГ ДВО РАН была установлена сеть KURILNET в составе восьми постоянных и нескольких периодических пунктов спутниково-геодезических измерений [Левин и др., 2007]. Целью установки данных станций было исследование современной геодинамики Сахалино-Курильского региона, обусловленной субдукцией Тихоокеанской литосферной плиты.

Сотрудники сектора ГМ совместно с коллегами из ИМГиГ ДВО РАН и ИО РАН проводят исследования геодинамических процессов, проявляющихся в Курильской островной дуге с целью установления тектонического и реологического строения региона, а также выявления особенностей процессов накопления и высвобождения упругих напряжений в ходе субдукции Тихоокеанской плиты под континент [Lobkovsky et al., 2017a; Steblov et al., 2018; Vladimirova et al., 2020].

Северо-Кавказский геодинамический полигон

В 2010 г. сотрудниками ЦО ФИЦ ЕГС РАН было выполнено развёртывание первого этапа Северо-Кавказского геодинамического полигона с целью исследования динамики коллизионной зоны Кавказа, а также проведения исследований ионосферы. В настоящий момент в составе полигона работают пять станций постоянных ГНСС-наблюдений. Используя данные, полученные на станциях полигона, сотрудники сектора ГМ совместно со специалистами Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ (ГАИШ) проводят исследования СДЗК в Северо-Кавказском регионе РФ [Milyukov et al., 2015; Milyukov et al., 2017].

Методологические основы развития геодинамического мониторинга в ФИЦ ЕГС РАН

Активное развитие технологии ГНСС-наблюдений, бурный рост числа станций наблюдений и, соответственно, накопленных объёмов данных способствовали более широкому применению

спутниковых геодезических данных как в науках о Земле в целом, так и в научной и практической деятельности ФИЦ ЕГС РАН в частности. В свою очередь, решение возникающих при этом задач потребовало развития теоретических и методологических основ обработки и интерпретации ГНСС-данных, совершенствования систем сбора, хранения и передачи исходных ГНСС-измерений, а также создания и совершенствования информационных ресурсов, направленных на распространение накопленных данных и результатов их обработки. Сотрудники сектора ГМ с 2007 г. провели большое количество разнообразных научных исследований и практических работ с целью разработки научно-методологической базы развития системы геодинамических наблюдений ФИЦ ЕГС РАН.

Обработка ГНСС-измерений

Геодинамический мониторинг с использованием данных ГНСС основан на интерпретации результатов постобработки исходных ГНСС-измерений, в частности, высокоточных координат пунктов наблюдений и оценок скоростей их смещений. В секторе ГМ освоена технология постобработки исходных ГНСС-измерений с помощью ПО GAMIT/GLOBK разработки Массачусетского технологического института (MIT) [Herring et al., 2015; Herring et al., 2018].

Обработка первичных фазовых измерений опорной сети ФИЦ ЕГС РАН с помощью ПО GAMIT/GLOBK осуществляется по двухэтапной схеме:

1 – разрешение целочисленных неопределённостей фазовых измерений и первичное уравнивание геодезической сети, составленной из станций ФИЦ ЕГС РАН и выбранных станций сети IGS. Результатом данного этапа являются ежесуточные поправки к априорным координатам станций ФИЦ ЕГС РАН вместе с соответствующей ковариационной матрицей, которые в дальнейшем рассматриваются как вторичные квази-измерения для дальнейшего совместного уравнивания;

2 – уравнивание по пространству и времени посредством фильтра Калмана всех полученных на первом этапе ежесуточных квази-измерений и соответствующих решений по станциям глобальной сети, задающим отсчётную основу, с целью определения высокоточных координат и скоростей пространственного движения станций ФИЦ ЕГС РАН в геоцентрической системе отсчёта ITRF.

Обработка данных региональных геодинамических полигонов производится по схожей схе-

ме с включением в расчёт на первом этапе ближайших станций опорной сети ФИЦ ЕГС РАН. В дальнейшем, на втором этапе, результаты расчётов также комбинируются с глобальным решением, что позволяет получить оценку координат и скоростей смещения станций региональных полигонов в геоцентрической отсчётной основе ITRF.

С целью повышения надёжности и развития потенциала ЦГН в секторе ГМ освоена технология получения собственного глобального решения с использованием набора из ~50 опорных станций, распределённых по Северному полушарию.

Первичные итоги обработки ГНСС-измерений, представляющие собой пространственные прямоугольные координаты станций ФИЦ ЕГС РАН и компоненты векторов их пространственного движения в системе отсчёта ITRF, в дальнейшем пересчитываются для представления в отечественных геоцентрических системах отсчёта (ПЗ-90 и ГСК-2011) с использованием разработанных в секторе ГМ конвертеров данных.

Непрерывный режим работы станций опорной сети и большинства станций региональных полигонов ФИЦ ЕГС РАН позволяет скомбинировать полученные ежесуточные оценки координат в продолжительные временные ряды для изучения изменчивости координат станций наблюдений, вызванной природными и техногенными процессами различного пространственно-временного и энергетического масштаба.

С целью исследования этих процессов сотрудниками сектора ГМ был разработан и реализован в виде программных пакетов ряд методов постобработки временных рядов ГНСС-данных. В частности, одной из важнейших задач геодинамического мониторинга является оценка косейсмических смещений станций ГНСС-наблюдений во время сильных землетрясений в режиме, близком к реальному времени. Разрабатываемая в секторе ГМ методология оперативного определения косейсмических смещений (рис. 4) позволяет сократить время получения устойчивой оценки величины смещения [Сдельникова, 2021], что является важным фактором для создания и развития геодинамической подсистемы системы предупреждения о цунами.

Другой важнейшей задачей геодинамического мониторинга является получение новых данных о режиме деформирования сейсмоактивного региона с целью прогнозирования его сейсмической опасности. Для решения этой задачи в секторе ГМ был разработан и реализован в виде комплекса подпрограмм алгоритм регрессионного

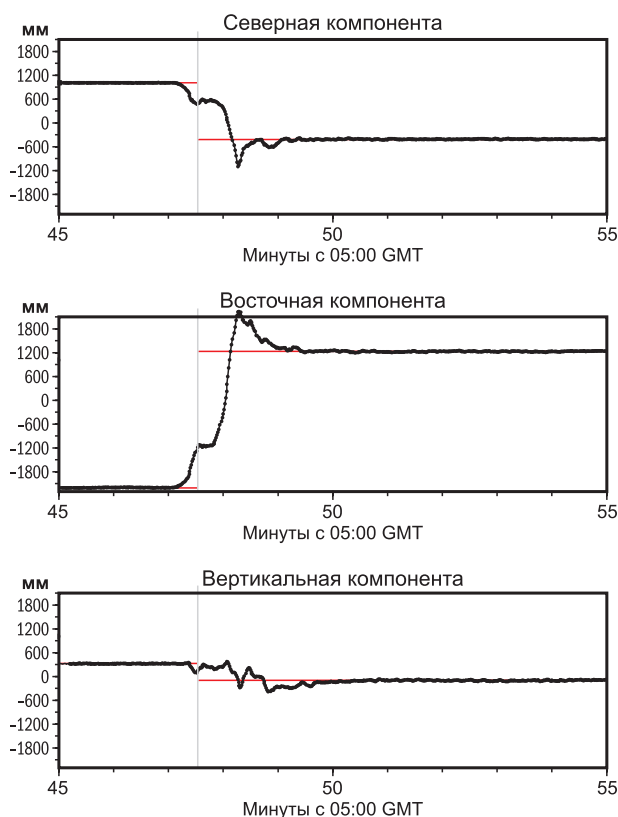


Рис. 4. Пример построения оценки косейсмического смещения станции ГНСС-наблюдений на Японских островах в ходе землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г. с $M_w=9.1$ [Сдельникова, 2021]

анализа временных рядов ГНСС-данных для учёта в смещениях пунктов вариаций различного происхождения (инструментального, техногенного и тектонического), а также различного спектрального состава (сезонные длиннопериодные, эпизодические короткопериодные, переходные и т.д.) [Габсатаров, 2012]. Результаты работы алгоритма широко используются в секторе ГМ при проведении работ по исследованию сейсмотектонических деформаций, проведению деформационного мониторинга и построению численных моделей геодинамических процессов.

Разработанный алгоритм регрессионного анализа лёг в основу «Методики определения координат и скоростей смещений точек стояния базовых станций глобальных навигационных спутниковых систем с учётом деформационной составляющей движения земной поверхности», созданной в 2019 г. в секторе ГМ с участием специалистов АО «Российские космические системы» и ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУТиТ). Данная методика описывает унифицированный подход к обработке ГНСС-измерений на стан-

циях опорных сетей для получения устойчивых оценок их координат и скоростей смещения, в том числе в тектонически активных регионах.

Моделирование геодинамических процессов

Развитие методов постобработки ГНСС-измерений в секторе ГМ позволило получить большой объем данных для проведения исследований современных движений земной коры. В частности, сотрудниками сектора ГМ проводятся многолетние исследования деформаций земной поверхности, вызванных различными геодинамическими процессами, как в стабильных платформенных регионах [Adushkin et al., 2014; Билянский и др., 2018], так и в высокоактивных регионах континентальных окраин [Kopylova et al., 2010; Vladimirova et al., 2011; Габсатаров, 2012; Гагашиш и др., 2019].

На основе результатов многолетних ГНСС-измерений на станциях наблюдений, расположенных в пределах Курильской островной дуги, Японского архипелага и центральной части Чили, сотрудниками сектора ГМ проведён детальный анализ сейсмотектонических деформаций, развивающихся вблизи очагов сильнейших землетрясений, на разных стадиях сейсмического цикла [Lobkovsky et al., 2017a; Lobkovsky et al., 2017b; Lobkovsky et al., 2018]. Данный анализ позволил с использованием геомеханических моделей строения и динамики субдукционных зон провести интерпретацию предсейсмических, косейсмических и постсейсмических деформаций земной поверхности, связанных с парными Симуширскими землетрясениями 2006–2007 гг. (Курильские острова), землетрясением Мауле 2010 г. (Чили) и землетрясением Тохоку 2011 г. (Япония) [Steblov et al., 2018; Lobkovsky et al., 2017b; Lobkovsky et al., 2018; Vladimirova et al., 2020]. В рамках проведённых исследований была разработана методология построения моделей геодинамических процессов, вызывающих смещения, наблюдаемые на поверхности Земли, в частности, модели эффективной подвижки в очаге землетрясения (рис. 5), модели фрикционного асейсмического развития сейсморазрыва и модели вязкоупругой релаксации в астеносфере и верхней мантии [Владимирова, Стеблов, 2015; Владимирова, Габсатаров, 2019; Vladimirova et al., 2020]. Отдельное внимание было уделено изучению процессов подготовки сильных субдукционных землетрясений, в рамках которого был разработан подход к оценке вариации коэффициента сцепленности поверхности межплитового контакта по данным ГНСС-измерений [Steblov et al., 2018; Steblov, Sdel'nikova, 2019; Владимирова, Габсатаров, 2021].

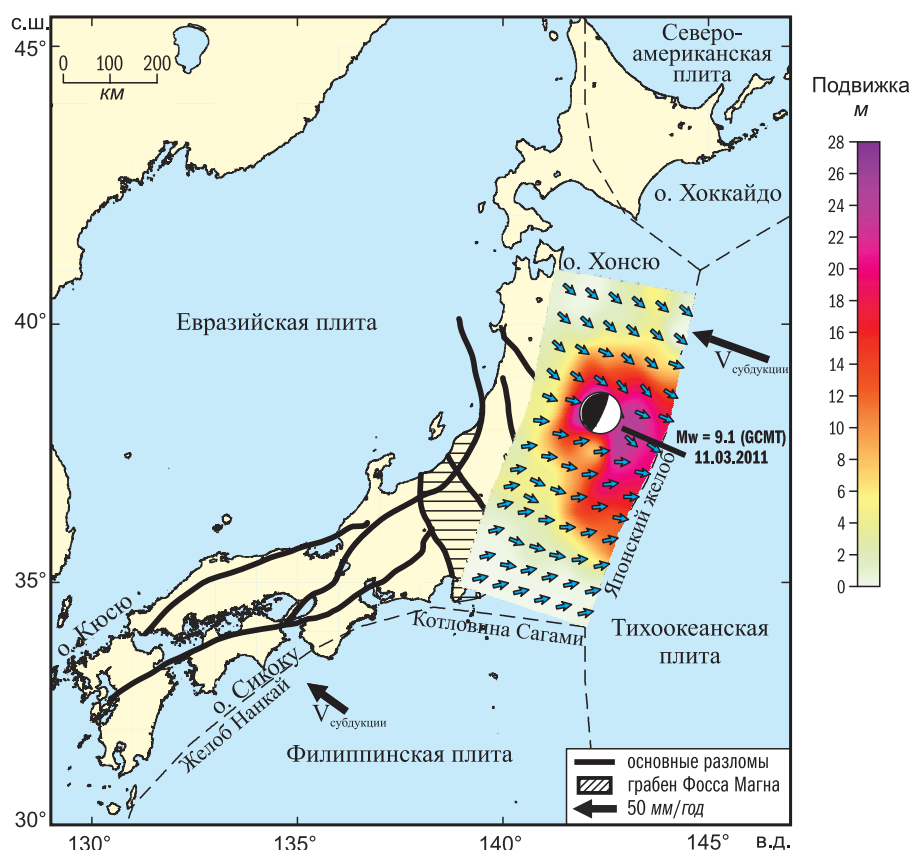


Рис. 5. Пример построения модели распределённой косейсмической подвижки в очаге землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г. с $M_w=9.1$ [Владимирова, Габсатаров, 2019]

В рамках подготовки научно-методологической базы создания геодинамической подсистемы системы предупреждения о цунами разработан подход к оценке вертикальных смещений дна океана в эпицентральной области сильнейших субдукционных землетрясений [Сдельникова, Стеблов, 2016].

В основе всех построенных моделей лежит модель дислокации в упругой среде, для расчёта которой применяется специализированное научное ПО, позволяющее производить расчёты как в однородной изотропной [Okada, 1992], так и в сферической слоистой средах [Pollitz, 1996; Pollitz, 1997], а также написанные сотрудниками сектора программные средства на высокоуровневых языках программирования и в среде Matlab.

Проведённые в секторе ГМ научные исследования позволили разработать методологию комплексного исследования косейсмических и постсейсмических деформаций земной поверхности в окрестности очагов крупных межплитовых землетрясений. Новизна и практическая значимость предложенной методологии состоит в возможности построения эффективного распределения подвижки в очаге землетрясения,

проявляющегося в постсейсмических смещениях земной поверхности, с одновременным уточнением реологических параметров среды, что позволяет получить сведения о параметрах очага землетрясения в отсутствие измерений непосредственно в момент сейсмического события. Кроме того, построенная методология позволяет уточнить прогноз сейсмической опасности в исследуемых регионах за счёт построения прямых оценок скорости накопления упругих напряжений в очаге будущего землетрясения, детализации области межплитового контакта и получения оценок скорости затухания постсейсмических процессов.

Перспективные направления развития геодинамического мониторинга в ФИЦ ЕГС РАН

Современные мировые тенденции развития информационных технологий, совершенствование методов спутниковой геодезии и геодинамического мониторинга требуют разработки новых и актуализации существующих методов сбора, обработки и интерпретации спутниковых

геодезических данных, применяемых в секторе геодинамического мониторинга ФИЦ ЕГС РАН. Особенную актуальность задача установления наиболее перспективных направлений развития геодинамического мониторинга в ФИЦ ЕГС РАН приобретает в условиях ограниченных материальных и человеческих ресурсов, а также существенного сокращения сотрудничества с международными организациями в рамках обмена спутниковыми геодезическими данными и результатами их обработки. Выбранные направления развития должны быть реализуемыми с учётом имеющихся ресурсов сектора ГМ, обеспечивать выполнение программы геодезических исследований, проводимых ФИЦ ЕГС РАН в рамках госзадания, способствовать созданию и развитию собственных технологий обработки и интерпретации спутниковых геодезических данных для решения задач геодезического и геодинамического мониторинга. Кроме того, выбор направлений развития должен содействовать реализации долгосрочных целей сектора ГМ, включающих:

- эффективное использование ресурсов сектора и содействие развитию творческого и научного потенциала, а также практических навыков его сотрудников;

- создание на базе сектора ГМ общероссийского центра хранения, обработки и распространения спутниковых геодезических данных;

- создание на базе сектора ГМ постоянно функционирующей службы геодинамического мониторинга;

- организация хозяйственной деятельности сектора.

В связи с этим выработка перспективных направлений развития геодинамических наблюдений может быть естественным образом основана на обобщении задач, возникающих в рамках достижения поставленных долгосрочных целей:

- организовать взаимодействие сектора ГМ с подразделениями ФИЦ ЕГС РАН, его филиалами и сторонними организациями;

- оказывать содействие развитию геодинамических полигонов, управляемых филиалами ФИЦ ЕГС РАН;

- организовать системы хранения и резервирования данных спутниковых геодезических наблюдений;

- разработать, реализовать и поддерживать информационные системы, представляющие различные результаты геодинамического мониторинга и работы станций сети ФИЦ ЕГС РАН;

- разработать новые методы обработки и интерпретации спутниковых данных;

- разработать методики проведения геодинамического мониторинга при проведении геодезических изысканий;

- провести обучение сотрудников ФИЦ ЕГС РАН и организовать группу проведения геодезических изысканий.

Результатом обобщения данных задач, с учётом указанных ранее факторов, являются следующие основные направления развития геодинамических наблюдений в ФИЦ ЕГС РАН: 1 – развитие информационных ресурсов сектора ГМ; 2 – разработка и совершенствование методов обработки ГНСС-данных и организации наблюдений; 3 – разработка научно-методологических основ создания службы геодинамического мониторинга.

Развитие информационных ресурсов (ИР) сектора ГМ

Развитие ИР направлено на создание унифицированной системы сбора, обработки и распространения данных спутниковых измерений опорной сети ФИЦ ЕГС РАН и региональных геодинамических полигонов. Решение этой задачи позволит существенно ускорить решение типовых задач сектора ГМ, повысить надёжность хранения данных и упростить администрирование управляющей системы. При проектировании ИР сектора ГМ необходимо предусмотреть: 1 – резервирование всех хранилищ данных; 2 – наличие авторизованного доступа к различным сегментам хранилища данных и записей базы данных; 3 – возможность доступа к хранилищу данных посредством различных протоколов (FTP, HTTP); 4 – возможность загрузки данных в хранилище внешними пользователями; 5 – наличие развитых средств администрирования базы данных; 6 – web-интерфейс должен быть изначально спроектирован для корректного отображения и удобного использования на различных классах устройств (настольный компьютер с большим экраном, компактный ноутбук, смартфон и др.). Кроме того, развиваемая система сбора и хранения должна соответствовать выработанным в ФИЦ ЕГС РАН стандартам и подходам к организации ИР [Бутырин, Красилов, 2021] и должна быть встроена в имеющиеся и проектируемые ИР организации. Развитие ИР сектора ГМ особенно актуально в условиях прекращения сотрудничества с мировыми центрами IGS по обмену ГНСС-измерениями и результатами их обработки.

Схематичное изображение создаваемой с учётом вышеописанных требований системы сбора, хранения и распространения спутниковых геодезических данных приведено на рис. 6.

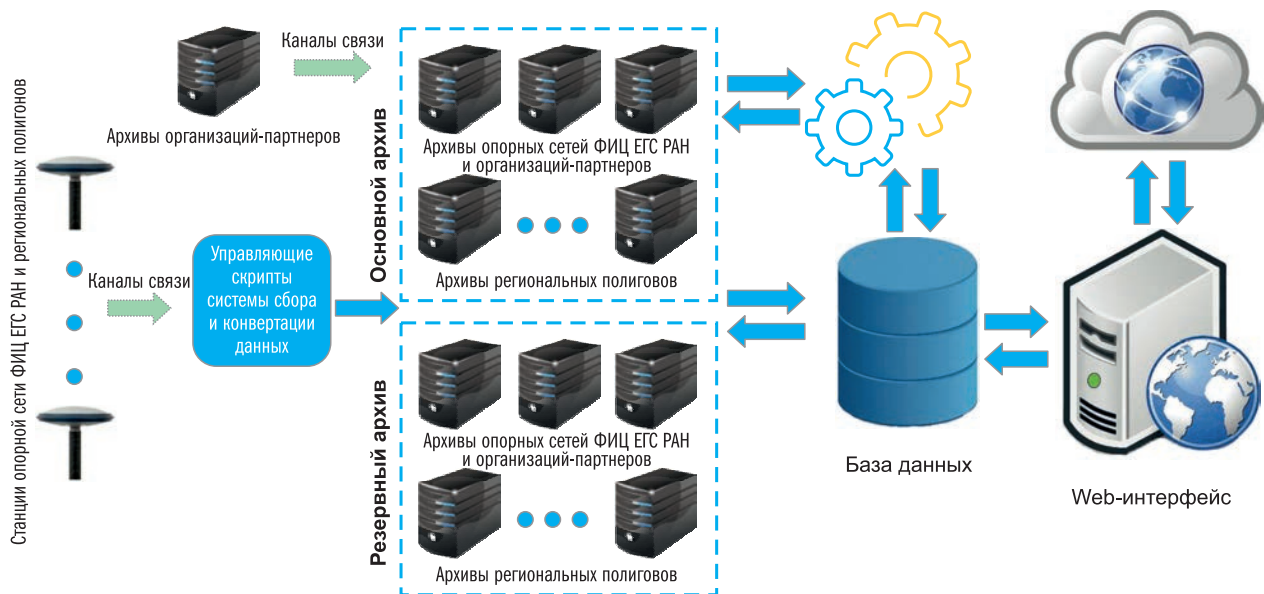


Рис. 6. Перспективная схема информационных ресурсов сектора ГМ

Ядром разрабатываемой системы является база данных, индексирующая содержимое хранилища данных и содержащая набор управляющих таблиц web-интерфейса, а также набор вспомогательных скриптов, реализующих управляющую систему сбора, обработки и передачи данных и результатов их обработки между станциями измерений, хранилищем данных и конечным пользователем.

Важнейшим этапом развития ИР сектора ГМ является создание унифицированного и автоматически резервируемого хранилища данных. Решение этой задачи позволит организовать систему оперативного слежения за состоянием и полнотой архива измерений, что существенно снизит трудоёмкость задачи поддержания функционирования архива и уменьшит время реакции администратора ИР на возникающие нештатные ситуации.

Доступ к данным хранилища будет организован посредством создаваемого веб-интерфейса с использованием защищённых протоколов передачи данных. Такой подход позволит гибко настраивать доступ отдельных пользователей или категорий пользователей к отдельным видам измерений и результатам их обработки с учётом требований ФСТЭК РФ.

Разработка и совершенствование методов обработки ГНСС-данных и организации наблюдений

Дальнейшее развитие методов обработки ГНСС-данных в секторе ГМ должно быть сосредоточено в рамках двух основных направлений: 1 – внедрение автоматизированного и унифицированного подхода к постобработке ГНСС-

данных, в том числе, с использованием рассмотренной ранее «Методики определения координат и скоростей смещений...» (далее «Методике»); 2 – разработка методики проведения геодезических изысканий.

Вопрос об организации ежесуточной обработки данных базовых станций на территории Российской Федерации с формированием собственного глобального решения и уточнением эфемероидно-временной информации стал особенно важным в свете прекращения передачи данных российских базовых сетей в мировые центры данных. Освоенные в секторе ГМ технологии и собственные программные разработки позволяют, в случае наращивания аппаратных ресурсов, решить задачу автоматизации обработки ГНСС-измерений с целью обеспечения возможности привязки станций наблюдений региональных полигонов к Международной общеземной отсчётной основе (ITRF) и отечественным отсчётным основам (ГСК-2011 и ПЗ-90). Внедрение в унифицированный подход дополнительного этапа, основанного на технологии регрессионного анализа, описанной в «Методике», позволит получать более корректные оценки координат и скоростей движения станций наблюдения и предоставить дополнительные данные для геодинамических исследований. Повышение точности оценок координат и скоростей движения базовых станций, в том числе пунктов Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), позволит повысить стабильность реализаций отечественных отсчётных основ (ПЗ-90 и ГСК-2011). Создание центра обработки ГНСС-измерений с унифицированным

подходом к обработке данных базовых станций ФИЦ ЕГС РАН и организаций-партнёров будет иметь большое значение для организации национальной службы мониторинга движения земной коры.

В рамках разработки методики геодезических изысканий необходимо провести обобщение созданных ранее подходов к камеральной обработке результатов ГНСС-измерений на объектах недропользования с учётом особенностей имеющегося полевого оборудования и программного обеспечения, а также требований ГК «Росатом» по проведению геодинамического мониторинга на площадках и в районе размещения АЭС. В 2021 г. для целей проведения геодинамического мониторинга в ФИЦ ЕГС РАН было закуплено четыре комплекта полевого приёмного оборудования Руснавгеосеть Фаза 2 и комплект программного оборудования для проведения камеральной обработки Trimble Business Center. Проводимые исследования будут направлены на определение оптимальных режимов использования полевого оборудования с целью достижения требуемой точности и детальности изысканий с минимальными экспедиционными затратами.

Разработка научно-методологических основ создания службы геодинамического мониторинга

Реализация системы автоматизированного сбора, хранения и обработки ГНСС-данных позволит перейти к созданию более сложных систем, основанных на интерпретации полученных результатов обработки.

Одним из наиболее проработанных и перспективных направлений интерпретации ГНСС-данных является разработка методики автоматизированного расчёта распределённой сейсмической подвижки в очаге землетрясения, которая позволит оперативно получать оценки магнитуды, глубины и пространственной локализации сейсмической подвижки по геодезическим данным. Важнейшими достоинствами предлагаемой системы является возможность получения независимых оценок параметров землетрясений и оперативность построения первичной модели очага землетрясения (первые минуты после сейсмического события).

Высокая скорость построения предварительной модели очага возможна за счёт разработанной сотрудниками сектора ГМ технологии предварительного проведения наиболее вычислительно ёмких расчётов и использования разработанного в секторе ГМ метода оперативного определения косейсмических смещений (рис. 4). Предварительный вычислительно ёмкий рас-

чёт отклика среды на мгновенную дислокацию выполняется для всех потенциальных мест возникновения сейсмических событий в регионе с использованием априорных геолого-геофизических данных. В момент построения модели выбор места возникновения землетрясения и ориентации плоскости разрыва осуществляется путём решения задачи классификации методами машинного обучения. В дальнейшем построенная модель очага может быть пересчитана с учётом дополнительных сейсмологических, геодезических и др. данных для построения финальной модели.

Построенная модель очага землетрясения по геодезическим данным (оперативная или финальная) может быть использована для расчёта начального возмущения океанического дна в моделях формирования и распространения волны цунами. В случае использования предварительной модели очага, полученной в первые минуты после землетрясения, такой подход позволяет организовать геодинамическую подсистему системы предупреждения о цунами.

Предлагаемые методы оперативного расчёта параметров землетрясений могут лечь в основу создания службы геодинамического мониторинга на Северном Кавказе, Камчатке, Курилах и Сахалине.

Заключение

Широкое применение разработанных в секторе ГМ методик постобработки данных ГНСС-наблюдений в автоматизированных информационных системах расширит номенклатуру мониторинговых параметров ФИЦ ЕГС РАН и увеличит возможности в области геодинамического мониторинга. В частности, система автоматизированного построения модели очага землетрясения позволит оперативно получать независимые оценки магнитуды, глубины и пространственной локализации подвижки, что, в свою очередь, будет способствовать развитию современного мультидисциплинарного подхода к исследованию сейсмических событий за счёт комплексирования сейсмологических и геодинамических данных.

Предложенные подходы к унификации и автоматизация процессов сбора, обработки и распространения ГНСС-данных, обмен данными с ведущими научными и производственными организациями в области наук о Земле и использование разработанных в секторе ГМ современных методов интерпретации результатов обработки ГНСС-данных позволят реализовать в ФИЦ ЕГС РАН общероссийский центр

хранения и обработки ГНСС-измерений. Создание подобного центра имеет большое значение для организации полностью независимой отечественной инфраструктуры, содействующей развитию геодезического мониторинга и геодинимических исследований.

Таким образом, реализация предложенных в работе направлений развития позволит ФИЦ ЕГС РАН прочно занять лидирующие позиции в РФ в области геодинимического мониторинга и проведения исследований СДЗК на площадках промышленных объектов и объектов недропользования.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22).

Литература

- Билинский В.В., Жариков М.Г., Затырко В.А., Корякин А.Ю., Стеблов Г.М. Выявление смещений земной поверхности по данным спутниковых геодезических наблюдений // *Геопрофи.* – 2018. – № 5. – С. 19–23.
- Бутырин П.Г., Красилов С.А. Единая система хранения и доступа к геофизическим данным. Традиции и новые подходы // *Российский сейсмологический журнал.* – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 77–87. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.4.05. – EDN: MEFWKZ
- Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Современная геодинимика Гаромайского активного разлома (остров Сахалин) // *Геодинимика и Тектонофизика.* – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 561–567. DOI: 10.5800/GT-2019-10-2-0426. – EDN: UKXKUI
- Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В. Изучение особенностей формирования и развития очаговой зоны землетрясения Тохоку 2011 г. на основе данных спутниковой геодезии // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных.* Материалы XV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 20. – EDN: RXTVWM
- Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В. Особенности сейсмического цикла, связанного с землетрясением Тохоку 2011 г. на основе данных GPS // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных.* Материалы XIV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 29. – EDN: HFRGVQ
- Владимирова И.С., Стеблов Г.М. Постсейсмическое развитие очаговых зон сильнейших землетрясений // *Геофизические исследования.* – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 27–38. – EDN: TVTUAF
- Габсатаров Ю.В. Анализ деформационных процессов в литосфере по геодезическим наблюдениям на примере разлома Сан-Андреас // *Геодинимика и Тектонофизика.* – 2012. – Т. 3, № 3. – С. 275–287. – EDN: PCEGOD
- Гарагаш И.А., Габсатаров Ю.В., Владимирова И.С. Исследование особенностей поля деформаций земной поверхности в Северо-Восточной Азии на основе данных спутниковой геодезии // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных.* Материалы XIV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 34. – EDN: KHDARC
- Левин Б.В., Фитцхью Б., Бурджуа Д., Рыбин А.В., Разжигаяева Н.Г., Белоусов А.Б., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И., Ньюшко Т.И., Харламов А.А. Коротеев И.Г. Комплексная экспедиция на Курильские острова в 2006 г. (I этап) // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук.* – 2007. – № 1. – С. 144–148. – EDN: IMQGON
- Мазуров Б.Т. Геодезические методы изучения геодинимических процессов: учебник. – СПб: Лань, 2020. – 324 с.
- Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений // *Геодинимика и тектонофизика.* – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 503–514. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0358. – EDN: XVEWZF
- Саньков В.А. Современная геодинимика внутриконтинентальных областей: инструментальные и геологогеоморфологические оценки движений и деформаций земной коры Центральной Азии // *Геодинимика и Тектонофизика.* – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 159–182. DOI: 10.5800/GT-2014-5-1-0122. – EDN: SFQYVF
- Сдельникова И.А. Сейсмические деформации сильнейших субдукционных землетрясений по данным спутниковой геодезии // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных.* Материалы XV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 85. – EDN: ZIEDPW
- Сдельникова И.А., Стеблов Г.М. Мониторинг цунамигенных землетрясений методами спутниковой геодезии // *Геофизические исследования.* – 2016. – Т. 17, № 1. – С. 46–55. – EDN: VPESAL
- Хаун В.Е. Региональная геотектоника: Внеальпийская Европа и Западная Азия. – М.: Недра, 1979. – 359 с.
- Adushkin V.V., Sanina I.A., Gorbunova E.M., Ivanchenko G.N., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V. Study of neotectonic activity of morphostructures in the central part of the East European craton by remote sensing methods // *Izvestiya. Physics of the Solid*

- Earth. — 2014. — 50(2). — 169–176. DOI: 10.1134/S1069351314020013. — EDN: SKPQIR
- Gordeev E.I., Gusev A.A., Levin V., Bakhtiarov V.F., Pavlov V., Chebrov V., Kasahara M. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia–Pacific–North America plate junction from GPS data // *Geophysical Journal International*. — 2001. — V. 147. — P. 189–198. DOI: 10.1046/J.0956-540X.2001.01515.X
- Gurtner W. RINEX: The Receiver-Independent Exchange Format // *GPS World*. — 1994. — V. 5, N 7. — P. 48–52.
- Herring T.A., Floyd M.A., King R.W., McClusky S.C. GLOBK, Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, Release 10.6. — Cambridge: MIT, 2015. — 95 p.
- Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. GAMIT Reference Manual, Release 10.7. — Cambridge: MIT, 2018. — 168 p.
- Kogan M.G., Burgmann R., Vasilenko N.F., Scholz C.H., King R.W., Ivashchenko A.I., Frolov D.I., Steblov G.M., Kim Ch.U., Egorov S.G. The 2000 *M*_w 6.8 Ugleorsk earthquake and regional plate boundary deformation of Sakhalin from geodetic data // *Geophysical Research Letters*. — 2003. — V. 30, N. 3, 1102. doi:10.1029/2002GL016399.
- Kogan M.G., Lerner A., Koczyński T., Gavrilov S.V., Galaganov O.N., Frolov D.I., Steblov G.M., King R.W. RUSEG: a GPS stride across northern Eurasia // *Eos, Transactions American Geophysical Union, Fall Meeting Supplement*. — 1996. — V. 77. — P. F149.
- Kopylova G.N., Boldina S.V., Steblov G.M., Sdel'nikova I.A. The possibility of estimating the coseismic deformation from water level observations in wells // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. — 2010. — V. 46, N 1. — P. 47–56. DOI: 10.1134/S1069351310010040. EDN: MXEARX
- Levin V.E., Bakhtiarov V.F., Titkov N.N., Serovetnikov S.S., Magus'kin M.A., Lander A.V. Contemporary crustal movements (CCMS) in Kamchatka // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. — 2014. — V. 50, N 6. — P. 732–751. DOI: 10.1134/S1069351314060044. — EDN: UFXDBR
- Lobkovsky L.I., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Steblov G.M. Seismotectonic deformations related to the 2011 Tohoku earthquake at different stages of the seismic cycle, based on satellite geodetic observations // *Doklady Earth Sciences*. — 2018. — V. 481, N 2. — P. 1060–1065. DOI: 10.1134/S1028334X18080159. — EDN: YBGXZR
- Lobkovsky L.I., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Baranov B.V., Garagash I.A. Post-seismic motions after the 2006–2007 Simushir earthquakes at different stages of the seismic cycle // *Doklady Earth Sciences*. — 2017a. — V. 473, N 1. — P. 375–379. DOI: 10.1134/S1028334X17030266. — EDN: EQSIJZ
- Lobkovsky L.I., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Baranov B.V., Garagash I.A., Steblov G.M. Seismotectonic deformations related to the 2010 Maule earthquake at different stages of the seismic cycle from satellite geodetic observations // *Doklady Earth Sciences*. — 2017b. — V. 477, N 2. — P. 1498–1503. DOI: 10.1134/S1028334X17120261. — EDN: XXTXHV
- Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Velocities of contemporary movements of the Northern Caucasus estimated from GPS observations // *Geotectonics*. — 2015. — V. 49, N 3. — P. 210–218. DOI: 10.1134/S0016852115030036. — EDN: UGDXYN
- Milyukov V.K., Mironov A.P., Steblov G.M., Ovsyuchenko A.N., Rogozhin E.A., Drobyshev V.N., Kusraev A.G., Khubaev K.M., Torchinov K.-M.Z. Satellite geodetic monitoring of the Vladikavkaz active fault zone: first results // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. — 2017. — V. 53, N 4. — P. 598–605. DOI: 10.1134/S1069351317040061. — EDN: XNUPQD
- Nikolaidis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system: Ph.D. Thesis. — University of California, San Diego, 2002. — 305 p.
- Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1992. — V. 82, N 2. — P. 1018–1040. DOI: 10.1785/BSSA0820021018
- Pollitz F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // *Geophysical Journal International* — 1996. — V. 125. — P. 1–14. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x
- Pollitz F.F. Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth // *Journal of Geophysical Research*. — 1997. — V. 102. — P. 17921–17941. DOI: 10.1029/97JB01277
- Steblov G.M., Kogan M.G., King R.W., Scholz C.H., Burgmann R., Frolov D.I. Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS // *Geophysical Research Letters*. — 2003. — V. 30, N 18. — P. 1924. DOI: 10.1029/2003GL017805
- Steblov G.M., Sdel'nikova I.A. Regularities in the spatiotemporal variations of deformation processes in the region of Japan subduction zone // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. — 2019. — V. 4. — P. 89–98. DOI: 10.1134/S1069351319040104. — EDN: VWYTXO
- Steblov G.M., Lobkovsky L.I., Vladimirova I.S., Baranov B.V., Sdel'nikova I.A., Gabsatarov Y.V. Seismotectonic deformations of the Kuril Island Arc during different phases of the seismic cycle: The Simushir earthquakes // *Journal of Volcanology and Seismology*. — 2018. — V. 12. — P. 412–423. DOI: 10.1134/S0742046318060076. — EDN: BZFWVI
- Takahashi N., Kasahara M., Kimata F., Miura S., Heki K., Seno T., Kato T., Vasilenko N., Ivashchenko A., Bahtiarov V., Levin V., Gordeev E., Korchagin F., Gerasimenko M. Velocity field of around the Sea

of Okhotsk and Sea of Japan regions determined from a new continuous GPS network data // *Geophysical Research Letters*. – 1999. – V. 26, N 16. – P. 2533–2536. DOI: 10.1029/1999GL900565

Vladimirova I.S., Lobkovsky L.I., Gabsatarov Y.V., Steblov G.M., Vasilenko D.I., Frolov D.I., Pрыtkov A.S. Patterns of the Seismic Cycle in the Kuril Island Arc from GPS Observations // *Pure and Applied Geophys-*

ics. – 2020. – V. 177. – P. 3599–3617. DOI: 10.1007/s00024-020-02495-z. – EDN: RSBXNS

Vladimirova I.S., Steblov G.M., Frolov D.I. Viscoelastic deformations after the 2006–2007 Simushir earthquakes // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2011. – V. 47, N 11. – P. 1020–1025. DOI: 10.1134/S1069351311100132. – EDN: PEDTUN

Сведения об авторах

Габсатаров Юрий Владимирович, канд. физ.-мат. наук, зав. сектором, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: yugyg@gsras.ru

Владимирова Ирина Сергеевна, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: vladis@gsras.ru

Сдельникова Ирина Александровна, уч. секретарь, науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: sdelnikova@gsras.ru

Geodynamic monitoring at the GS RAS: Current state and development prospects

© 2022 I.V. Gabsatarov, I.S. Vladimirova, I.A. Sdel'nikova

GS RAS, Obninsk, Russia

Received September 5, 2022

Abstract Modern trends in geosciences includes numerical modeling based on vast amounts of direct earth's surface measurements. A significant increase in the accuracy, detail and scale of the aforementioned measurements in recent decades is based on the active development of space and satellite geodetic methods, as well as the creation of dense observation networks. GS RAS is one of the pioneers in the development of geodynamic monitoring systems based on the usage of satellite geodetic data on the territory of the Russian Federation. The goal of maintaining the leadership position of the GS RAS in the field of geodynamic monitoring emphasizes the development of modern satellite geodetic methods in conditions of limited resources and the need to develop import-substituting technologies. The article considers the existing scientific and methodological groundwork created in the geodynamic monitoring sector of the GS RAS, and formulates promising development areas of the geodynamic monitoring subsystem.

Keywords Satellite geodesy, geodynamical monitoring, modern displacements of earth's crust, numerical modeling, deformation processes, earthquake source modeling, tsunami forecast.

For citation Gabsatarov, I.V., Vladimirova, I.S., & Sdel'nikova, I.A. (2022). [Geodynamic monitoring at the GS RAS: Current state and development prospects]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(4), 7-23. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2022.4.01. EDN: MHBLYM

References

- Adushkin, V.V., Sanina, I.A., Gorbunova, E.M., Ivanchenko, G.N., Vladimirova, I.S., & Gabsatarov, Y.V. (2014). Study of neotectonic activity of morphostructures in the central part of the East European craton by remote sensing methods. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(2), 169-176. DOI: 10.1134/S1069351314020013. EDN: SKPQIR
- Bilyanskiy, V.V., Zharikov, M.G., Zatyрко, V.A., Koryakin, A.Yu., & Steblov, G.M. (2018). [Detection of displacements of the Earth's surface according to satellite geodetic observations]. *Geoprofi* [Geoprofi], 5, 19-23. (In Russ.).
- Butyrin, P.G., & Krasilov, S.A. (2021). [Unified system of storage and access to geophysical data. Traditions and new approaches]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(4), 77-87. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2021.4.05. EDN: MEFWKZ
- Gabsatarov, Y.V. (2012). [Analysis of deformation processes in the lithosphere from geodetic measurements based on the example of the San Andreas Fault]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 3(3), 275-287. (In Russ.). EDN: PCEGOD
- Garagash, I.A., Gabsatarov, Y.V., & Vladimirova, I.S. (2019). [Study of the surface deformation field features in Northeast Asia based on satellite geodetic data]. In *Materialy XIV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the XIV International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (p. 34). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: KHDARC
- Gordeev, E.I., Gusev, A.A., Levin, V., Bakhtiarov, V.F., Pavlov, V., Chebrov, V., & Kasahara, M. (2001). Preliminary analysis of deformation at the Eurasia–Pacific–North America plate junction from GPS data. *Geophysical Journal International*, 147, 189-198. DOI: 10.1046/J.0956-540X.2001.01515.X
- Gurtner, W. (1994). RINEX: The Receiver-Independent Exchange Format. *GPS World*, 5(7), 48-52.
- Herring, T.A., Floyd, M.A., King, R.W., & McClusky, S.C. (2015). *GLOBK, Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, Release 10.6*. Cambridge: MIT, 95 p.
- Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A., & McClusky, S.C. (2018). *GAMIT Reference Manual, Release 10.7*. Cambridge: MIT, 168 p.
- Khain, V.E. (1979). *Regional'naiia geotektonika: Vneal'piiskaia Evropa i Zapadnaia Azia* [Regional geotectonics: Non-Alpine Europe and Western Asia]. Moscow, Russia: Nedra Publ., 359 p. (In Russ.).

- Kogan, M.G., Burgmann, R., Vasilenko, N.F., Scholz, C.H., King, R.W., Ivashchenko, A.I., Frolov, D.I., Steblov, G.M., Kim, Ch.U., & Egorov, S.G. (2003). The 2000 Mw 6.8 Ulegorsk earthquake and regional plate boundary deformation of Sakhalin from geodetic data. *Geophysical Research Letters*, 30(3), 1102. DOI: 10.1029/2002GL016399
- Kogan, M.G., Lerner, A., Koczyński, T., Gavrilov, S.V., Galaganov, O.N., Frolov, D.I., Steblov, G.M., & King, R.W. (1996). RUSEG: a GPS stride across Northern Eurasia. *Eos, Transactions American Geophysical Union, Fall Meeting Supplement*, 77, F149.
- Kopylova, G.N., Boldina, S.V., Steblov, G.M., & Sdel'nikova, I.A. (2010). The possibility of estimating the coseismic deformation from water level observations in wells. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 46(1), 47-56. DOI: 10.1134/S1069351310010040. EDN: MXEARX
- Levin, B.V., Fitzhugh, B., Bourgeois, D., Rybin, A.V., Razhigaeva, N.G., Belousov, A.B., Vasilenko, N.F., Frolov, D.I., Nyushko, T.I., Kharlamov, A.A., & Koroteev, I.G. (2007). [Complex expedition to the Kuril Islands in 2006 (I stage)]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk* [Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences], 1, 144-148. (In Russ.). EDN: IMQGON
- Levin, V.E., Bakhtiarov, V.F., Titkov, N.N., Serovetnikov, S.S., Magus'kin, M.A., & Lander, A.V. (2014). Contemporary crustal movements (CCMS) in Kamchatka. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(6), 732-751. DOI: 10.1134/S1069351314060044. EDN: UFXDBR
- Lobkovsky, L.I., Vladimirova, I.S., Gabsatarov, Y.V., Baranov, B.V., & Garagash, I.A. (2017a). Post-seismic motions after the 2006–2007 Simushir earthquakes at different stages of the seismic cycle. *Doklady Earth Sciences*, 473(1), 375-379. DOI: 10.1134/S1028334X17030266. EDN: EQSIJZ
- Lobkovsky, L.I., Vladimirova, I.S., Gabsatarov, Y.V., Baranov, B.V., Garagash, I.A., & Steblov, G.M. (2017b). Seismotectonic deformations related to the 2010 Maule earthquake at different stages of the seismic cycle from satellite geodetic observations. *Doklady Earth Sciences*, 477(2), 1498-1503. DOI: 10.1134/S1028334X17120261. EDN: XTXHV
- Lobkovsky, L.I., Vladimirova, I.S., Gabsatarov, Y.V., & Steblov, G.M. (2018). Seismotectonic deformations related to the 2011 Tohoku earthquake at different stages of the seismic cycle, based on satellite geodetic observations. *Doklady Earth Sciences*, 481(2), 1060-1065. DOI: 10.1134/S1028334X18080159. EDN: YBGXZR
- Mazurov, B.T. (2020). *Geodezicheskie metody izucheniia geodinamicheskikh protsessov: uchebnik* [Geodetic methods for studying geodynamic processes : textbook]. Saint-Petersburg, Russia: Lanbook Publ., 324 p. (In Russ.).
- Milyukov, V.K., Mironov, A.P., Rogozhin, E.A., & Steblov, G.M. (2015). Velocities of contemporary movements of the Northern Caucasus estimated from GPS observations. *Geotectonics*, 49(3), 210-218. DOI: 10.1134/S0016852115030036. EDN: UGDXYN
- Milyukov, V.K., Mironov, A.P., Steblov, G.M., Ovsyuchenko, A.N., Rogozhin, E.A., Drobyshev, V.N., Kusraev, A.G., Khubaev, K.M., & Torchinov, K.-M.Z. (2017). Satellite geodetic monitoring of the Vladikavkaz active fault zone: first results. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 53(4), 598-605. DOI: 10.1134/S1069351317040061. EDN: XNUPQD
- Nikolaidis, R. (2002). *Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system: Ph.D. Thesis*. University of California, San Diego, 305 p.
- Okada, Y. (1992). Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2), 1018-1040. DOI: 10.1785/BSSA0820021018
- Pollitz, F.F. (1996). Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth. *Geophysical Journal International*, 125, 1-14. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x
- Pollitz, F.F. (1997). Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth. *Journal of Geophysical Research*, 102, 17921-17941. DOI: 10.1029/97JB01277
- Prytkov, A.S., & Vasilenko, N.F. (2018). [Earth surface deformation of the Sakhalin Island from GPS data]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 9(2), 503-514. (In Russ.). DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0358. EDN: XVEWZF
- Sankov, V.A. (2014). [Recent geodynamics of intra-continental areas: instrumental and geomorphological assessment of crustal movements and deformation in Central Asia]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 5(1), 159-182. (In Russ.). DOI: 10.5800/GT-2014-5-1-0122. EDN: SFQYVF
- Sdel'nikova, I.A. (2021). [Seismic deformations of the largest subduction earthquakes on the basis of satellite geodesy]. In *Materialy XV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the XV International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (p. 85). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: ZIEDPW
- Sdel'nikova, I.A., & Steblov, G.M. (2016). [Monitoring of tsunamigenic earthquakes using satellite geodesy methods]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 17(1), 46-55. (In Russ.). EDN: VPESAL
- Steblov, G.M., Kogan, M.G., King, R.W., Scholz, C.H., Burgmann, R., & Frolov, D.I. (2003). Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS. *Geophysical Research Letters*, 30(18), 1924. DOI: 10.1029/2003GL017805

- Steblov, G.M., Lobkovsky, L.I., Vladimirova, I.S., Baranov, B.V., Sdel'nikova, I.A., & Gabsatarov, Y.V. (2018). Seismotectonic deformations of the Kuril Island Arc during different phases of the seismic cycle: The Simushir earthquakes. *Journal of Volcanology and Seismology*, 12, 412-423. DOI: 10.1134/S0742046318060076. EDN: BZFBVWI
- Steblov, G.M., & Sdel'nikova, I.A. (2019). Regularities in the spatiotemporal variations of deformation processes in the region of Japan subduction zone, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 4, 89-98. DOI: 10.1134/S1069351319040104. EDN: VWYTXO
- Takahashi, N., Kasahara, M., Kimata, F., Miura, S., Heki, K., Seno, T., Kato, T., Vasilenko, N., Ivashchenko, A., Bahtiarov, V., Levin, V., Gordeev, E., Korchagin, F., & Gerasimenko, M. (1999). Velocity field of around the Sea of Okhotsk and Sea of Japan regions determined from a new continuous GPS network data. *Geophysical Research Letters*, 26(16), 2533-2536. DOI: 10.1029/1999GL900565
- Vasilenko, N.F., & Prytkov, A.S. (2019). [Contemporary geodynamics of the Garomai active fault (Sakhalin island)]. *Geodinamika i tektonofizika [Geodynamics & Tectonophysics]*, 10(2), 561-567. (In Russ.). DOI: 10.5800/GT-2019-10-2-0426. EDN: UKXKUI
- Vladimirova, I.S., & Gabsatarov, Y.V. (2019). [Features of the seismic cycle related to the 2011 Tohoku earthquake based on GPS data]. In *Materialy XIV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannyykh"* [Proceedings of the XIV International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (p. 29). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: RXTVWM
- Vladimirova, I.S., & Gabsatarov, Y.V. (2021). [Study of the features of the generation and development of the source zone of the 2011 Tohoku earthquake based on satellite geodetic data]. In *Materialy XV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannyykh"* [Proceedings of the XV International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (p. 20). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: RXTVWM
- Vladimirova, I.S., Lobkovsky, L.I., Gabsatarov, Y.V., Steblov, G.M., Vasilenko, D.I., Frolov, D.I., & Prytkov, A.S. (2020). Patterns of the seismic cycle in the Kuril Island Arc from GPS observations. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 3599-3617. DOI: 10.1007/s00024-020-02495-z. EDN: RSBXNS
- Vladimirova, I.S., & Steblov, G.M. (2015). [Postseismic development of source zones of strongest earthquakes]. *Geofizicheskie issledovaniia [Geophysical Research]*, 16(2), 27-38. (In Russ.). EDN: TVTUAF
- Vladimirova, I.S., Steblov, G.M., & Frolov, D.I. (2011). Viscoelastic deformations after the 2006-2007 Simushir earthquakes. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 47(11), 1020-1025. DOI: 10.1134/S106935131100132. EDN: PEDTUN

Information about authors

Gabsatarov Yurii Vladimirovich, PhD, Head of sector, Senior Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: yuryg@gsras.ru

Vladimirova Irina Sergeevna, PhD, Senior Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: vladis@gsras.ru

Sdel'nikova Irina Aleksandrovna, PhD, Researcher, Scientific Secretary of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: sdelnikova@gsras.ru