ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 499, № 2, с. 144–150

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 551.24.02:551.243

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ БЛОКОВО-РАЗЛОМНОЙ СТРУКТУРЫ В РАЙОНЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2008 И 2020 г. НА ЮЖНОМ БАЙКАЛЕ МЕТОДАМИ СПУТНИКОВОЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2021 г. Академик РАН В. Г. Бондур[1,*], Т. Н. Чимитдоржиев[1, 2], Ц. А. Тубанов[3], А. В. Дмитриев[2], П. Н. Дагуров[2]

Поступило 27.04.2021 г.
После доработки 28.04.2021 г.
Принято к публикации 28.04.2021 г.

С использованием методов спутниковой радиолокационной интерферометрии проанализированы смещения земной поверхности до и после землетрясений, состоявшихся вблизи южного берега озера Байкал 21 сентября 2020 г. (Быстринское землетрясение с магнитудой $M = 5.5$) и 27 августа 2008 г. (Култукское землетрясение с магнитудой $M = 6.3$). Для исследования деформационных процессов использовались данные дистанционного зондирования, полученные радиолокаторами с синтезированной апертурой спутника Sentinel-1B (C-диапазон) и спутников ALOS-1/2 PALSAR-1/2 (L-диапазон). На основании результатов анализа спутниковых радарных интерферометрических измерений за периоды времени с мая 2017 по начало октября 2020 г. для Быстринского и с января 2007 по конец февраля 2011 г. для Култукского землетрясений, обнаружены блоки с различными скоростями деформаций, разность величин которых перед Быстринским землетрясением составляла 14 мм, а перед Култукским землетрясением – 12–13 мм.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиоинтерферометрия, сейсмоопасные территории, землетрясения, напряженно-деформированное состояние, космический мониторинг

DOI: 10.31857/S268673972108003X

ВВЕДЕНИЕ

Для предупреждения и снижения последствий таких опасных природных процессов, как землетрясения, необходимо развивать методы мониторинга обширных сейсмоопасных территорий, наиболее перспективными среди которых являются космические методы [1, 2]. Для решения этой проблемы необходимо регистрировать различные предвестники землетрясений, проявляющиеся, например, в изменении структуры линеаментов, регистрируемых по космическим изображениям [1], в аномалиях различных физических полей, в том числе в вариациях ионосферных параметров [2] и др. в период подготовки и протекания сейсмических событий. Одним из эффективных подходов для прогноза землетрясений является анализ напряженно-деформационного состояния земной коры сейсмоопасных районов. Для этого могут использоваться методы, основанные на использовании геомеханических моделей [3–5]. Для прогноза могут использоваться также различные подходы, например, основанные на методах сейсмической энтропии [6].

Для регистрации деформаций земной коры в сейсмоопасных районах перспективно использование всепогодных методов спутниковой радиолокационной интерферометрии, которые в настоящее время являются важным инструментом для измерения подвижек земной поверхности, обусловленных различными физическими причинами [7–10].

21 сентября 2020 г. вблизи южной оконечности оз. Байкал произошло Быстринское землетрясение с магнитудой $M = 5.5$. В этом же районе ранее, 27 августа 2008 г., было зафиксировано сильное Култукское землетрясение с магнитудой $M = 6.3$. Район землетрясений представляет собой сейсмоактивную область сочленения Южно-Байкальской и Тункинской впадин, играющую важную роль в изучении структуры и эволюции Байкальского рифта. Территория также представляет интерес с экологической точки зрения из-за хра-

[1] *Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС", Москва, Россия*
[2] *Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия*
[3] *Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия*
**E-mail: vgbondur@aerocosmos.info*

нилища промышленных отходов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.

В настоящем сообщении приведены результаты исследования смещения земной поверхности до и после (для Култукского) землетрясений, включая косейсмические. Для исследований применялись методы спутниковой радиолокационной интерферометрии (РИ). В методах РИ используются данные о разности фаз радарных сигналов, полученных в различные моменты времени пролета спутников над исследуемой территорией, в частности, до и после какого-либо события [8, 9, 10]. Эти разности фаз пропорциональны разностям расстояний, пройденных радарными волнами. Полученные разности расстояний и позволяют определить смещения земной поверхности. В работе рассматривается возможная сейсмотектоническая природа динамики поверхности, связанная с периодом, предшествующим землетрясениям.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа деформационных процессов на исследуемой территории использовались космические изображения, полученные радиолокаторами с синтезированной апертурой спутника Sentinel-1B, функционирующего на длине волны 5.6 см (C-диапазон) и спутников ALOS-1/2 PALSAR-1/2 с длиной волны 23.5 см (L-диапазон). Важными достоинствами данных Sentinel-1 для исследований и космического мониторинга являются свободный доступ и регулярный характер спутниковой съемки с периодом 12 дней, позволяющие формировать временные серии изображений. Интерферометрические снимки, полученные ALOS-1/2 PALSAR-1/2 вследствие большей длины волны, обладают существенно большей когерентностью, характеризующей качество интерферометрических пар снимков. Однако в настоящее время периодичность радиолокационного зондирования L-диапазона в интерферометрическом режиме нерегулярна и может составлять год и более.

В качестве методов дистанционного зондирования в работе использовались “классический” метод дифференциальной радиолокационной интерферометрии (ДРИ, DinSAR) [7] и метод постоянных рассеивателей (Persistent Scatterers, PS) [8]. Главное ограничение метода ДРИ, основанного на анализе двух разновременных изображений, образующих интерферометрическую пару, – временная и пространственная декорреляция радиолокационных эхо-сигналов. Метод PS является развитием ДРИ, использующим временные серии радарных изображений. Он позволяет рассчитать динамику точечных постоянных рассеивателей, которыми являются объекты типа “квазиуголковых” отражателей, с достаточно сильным и устойчивым во времени отраженным сигналом (соответственно с высокими величинами когерентности). Для этих постоянных рассеивателей рассчитывается множество интерферометрических фазовых соотношений относительно одного опорного изображения, которое позволяет более точно, по сравнению с ДРИ, оценить величину и скорость деформаций дискретно расположенных постоянных рассеивателей. Увеличение точности достигается за счет использования нескольких десятков интерферограмм. Это позволяет существенно уменьшить влияние атмосферы и неточностей опорной цифровой модели рельефа и орбитальные ошибки. Недостаток метода PS – результат в виде отдельных точек, поэтому логичным является его комбинирование с ДРИ, результатом применения которой является непрерывное поле деформаций поверхности [9].

С учетом этого исследование сейсмических процессов на активизированном разломе Байкальского рифта выполнялось с помощью комплексирования метода ДРИ по данным радиолокаторов ALOS-1/2 PALSAR-1/2 (с временными интерферометрическими базами год и более, всего 4 радарных сцены) и метода PS с использованием временных серий Sentinel-1B (47 изображений бесснежного периода) и ALOS PALSAR (28 изображений). Зонирование подвижных блоков и оценка трендов направленности движений проводились методом ДРИ. При помощи метода PS проведена детализация характера деформации поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. АНАЛИЗ

Очаг Быстринского землетрясения магнитудой $M = 5.5$, произошедшего 21 сентября 2020 г., расположен в юго-восточной оконечности Главного Саянского разлома (ГСР), сейсмический потенциал которого, по палеосейсмогеологическим данным, оценивается как $M = 8.0$ [11]. Эпицентр землетрясения (желтая звездочка на рис. 1), расположенный вблизи деревни Быстрая, в геоморфологическом плане тяготеет к сочленению Тибельтинской междувпадинной перемычки и Быстринской впадины [12]. Эпицентр Култукского землетрясения 2008 г. с магнитудой $M = 6.3$, произошедшего 27 августа 2008 г. (зеленая звездочка на рис. 1), находился в акватории Байкала. Красные линии на рис. 1 – неотектонические разломы [13]. Градациями зеленого и коричневого цвета на рис. 1 представлены косейсмические смещения вдоль линии распространения (направления радиолокационного обзора) электромагнитной волны от спутникового радара. Схема создана методом ДРИ по данным интерферометрической пары изображений Sentinel-1, полученных за 10 дней до Быстринского события

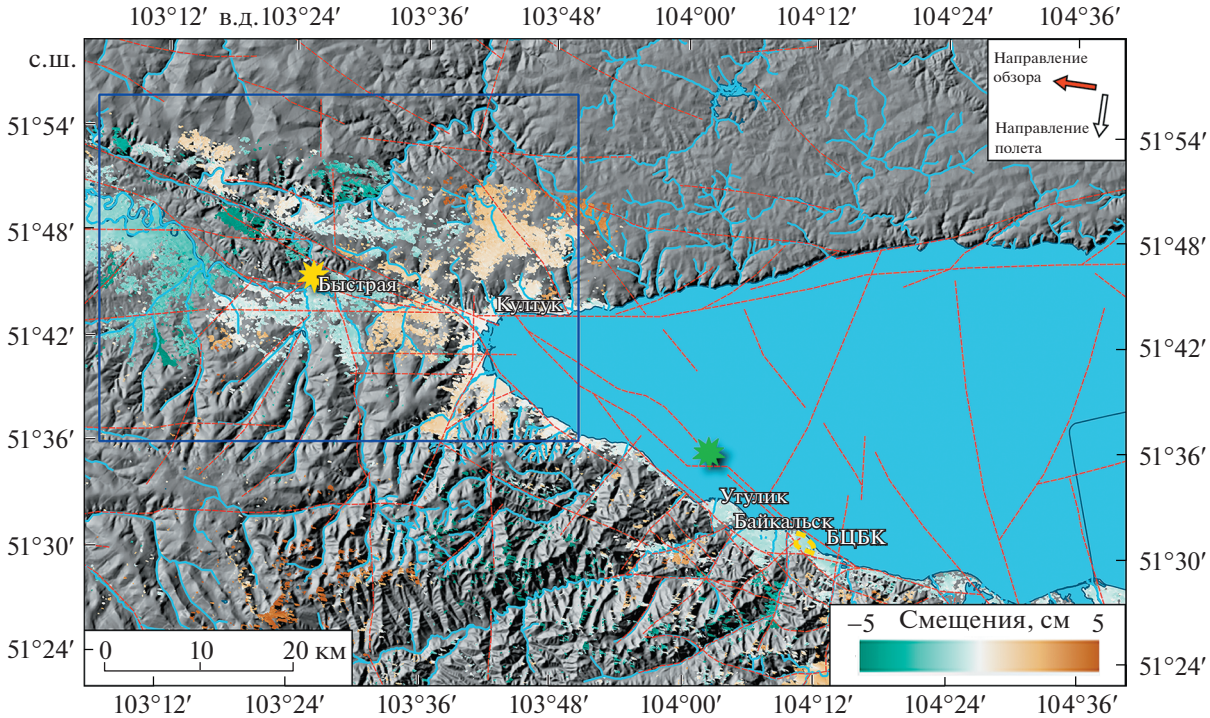

Рис. 1. Схема косейсмических смещений земной поверхности по данным ДРИ Sentinel-1.

(11 сентября 2020 г.) и через 2 дня после события (23 сентября 2020 г.).

Значительная часть интерферометрических данных, вследствие низких величин когерентности, не могла быть использована для измерений, поэтому распределение косейсмических деформаций представлено фрагментарно. Тем не менее ключевые участки сейсмоактивного линеамента в районе Тункино-Южно-Байкальской перемычки, а также вдоль южного берега оз. Байкал характеризуются достаточно значимыми величинами деформаций. В исследуемой области Быстринского землетрясения (прямоугольник на рис. 1) отчетливо выделяются две зоны с противоположным направлением движений. Проседание земной поверхности до 3–5 см выявлено на небольшом участке вдоль разлома в непосредственной близости от эпицентра Быстринского землетрясения. В целом зона проседания (зеленый оттенок) охватывала целиком участок поймы реки Иркут, в то время как зона, окрашенная светло-коричневым цветом, располагающаяся ближе к оконечности оз. Байкал, испытывала подъем (до 1–2 см).

Для анализа геодинамики в районе эпицентра (выделенный прямоугольник на рис. 1), в период, предшествующий землетрясению, были установлены границы активных блоков с различной геодинамикой. Контуры блоков были получены методом ДРИ (рис. 2) по данным интерферометрической пары ALOS-2 PALSAR-2 (27 июня 2019 г.–25 июня 2020 г.), с очень малой пространственной интерферометрической базой 2,1 м, обеспечивающей высокую пространственную когерентность и точность измерения относительных деформаций. Зеленым цветом на рис. 2 выделена область условного проседания, а коричневым цветом выделена область условного поднятия, без учета фазового пьедестала (неизвестной аддитивной константы). Смещения за соответствующий промежуток времени в один год представлены вдоль линии распространения (направления радиолокационного обзора) электромагнитной волны от спутникового радара ALOS-2 PALSAR-2.

Методом PS была рассчитана динамика множества постоянных рассеивателей в пределах участка, выделенного прямоугольником на рис. 1, которые были сегментированы в соответствии с расположением на блоке опускания или поднятия (см. рис. 2). Красным цветом на этом рисунке выделены рассеиватели, расположенные в области условного поднятия, выявленной по данным ДРИ, синие треугольники соответствуют рассеивателям в области условного опускания. Для расчетов использовались 47 изображений, полученных с борта спутника Sentinel-1B за период времени с 06 мая 2017 по 05 октября 2020 г. Для исключения влияния сезонных факторов, связанных с фазовым сдвигом вследствие морозного пучения [14] и наличием снежного покрова [15], были использованы данные бесснежного периода

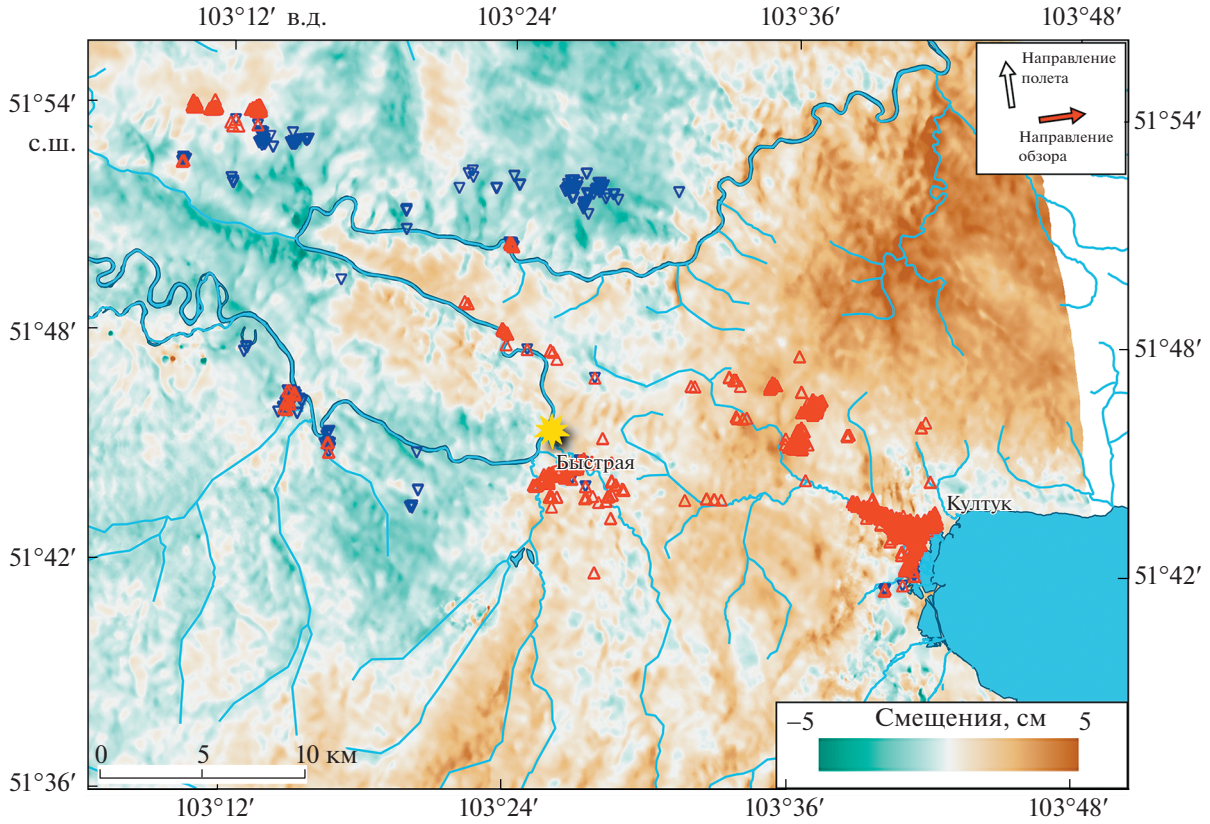

Рис. 2. Результаты оценки смещений в период до землетрясения методом ДРИ по паре изображений ALOS-2 PALSAR-2 с датами съемки 27.06.2019 и 25.06.2020 и местоположения постоянных рассеивателей.

на согласованной вертикальной поляризации. Данные по смещениям постоянных рассеивателей были усреднены и представлены на рис. 3а в виде отдельных временных рядов для каждой области. Красной стрелкой на рис. 3а обозначен момент землетрясения.

Обнаруженная методом ДРИ граница раздела блоков (см. рис. 2) с разным характером подвижки земной поверхности, вблизи которой находился эпицентр Быстринского землетрясения, располагается поперек простирания сейсмоактивного разлома. Подобное соотношение направленности движения блоков согласуется с данными геоморфологии. Инверсионное *воздымание* межвпадинной перемычки является одной из причин циклических миграций русла реки Иркут в субмеридиональном направлении [12]. Поднятые тектонические ступени являются основой междурифтовых перемычек, где периодически случаются землетрясения относительно небольшой силы.

В целом согласно приведенным на рис. 3а зависимостям наблюдается поднятие блоков с разной скоростью для разных областей, которое в среднем прекратилось перед землетрясением при разности величин деформаций 14 мм. При этом начальные данные в 2017 г. также в среднем показывают отсутствие деформаций. Результирующие деформации за 3 года составили в среднем примерно 16 и 30 мм для различных областей. Можно предположить, что данные величины являются некоторым порогом деформаций, который привел к землетрясению в данной части Байкальского рифта.

Методика с комплексированием ДРИ и метода PS также была использована при ретроспективном анализе движений в период Култукского землетрясения магнитудой $M = 6.3$, произошедшего 27 августа 2008 г. Смежное расположение эпицентров землетрясений на одном сейсмоактивном линеаменте позволяет сопоставить сейсмическое событие, произошедшее в 2020 г. с Култукским землетрясением 2008 г., одним из сильнейших за историю наблюдений в этом районе. По данным ДРИ (ALOS-1 PALSAR-1, 06 июля 2008–09 июля 2009) в тыловой части эпицентральной области землетрясения были выявлены два небольших подвижных блока в районе п. Утулик и г. Байкальск, ограниченные прибортовым Утуликским разломом. С использованием метода PS по 28 изображениям ALOS-1 PALSAR-1 данной области была рассчитана динамика постоянных рассеивателей, которые были разделе-

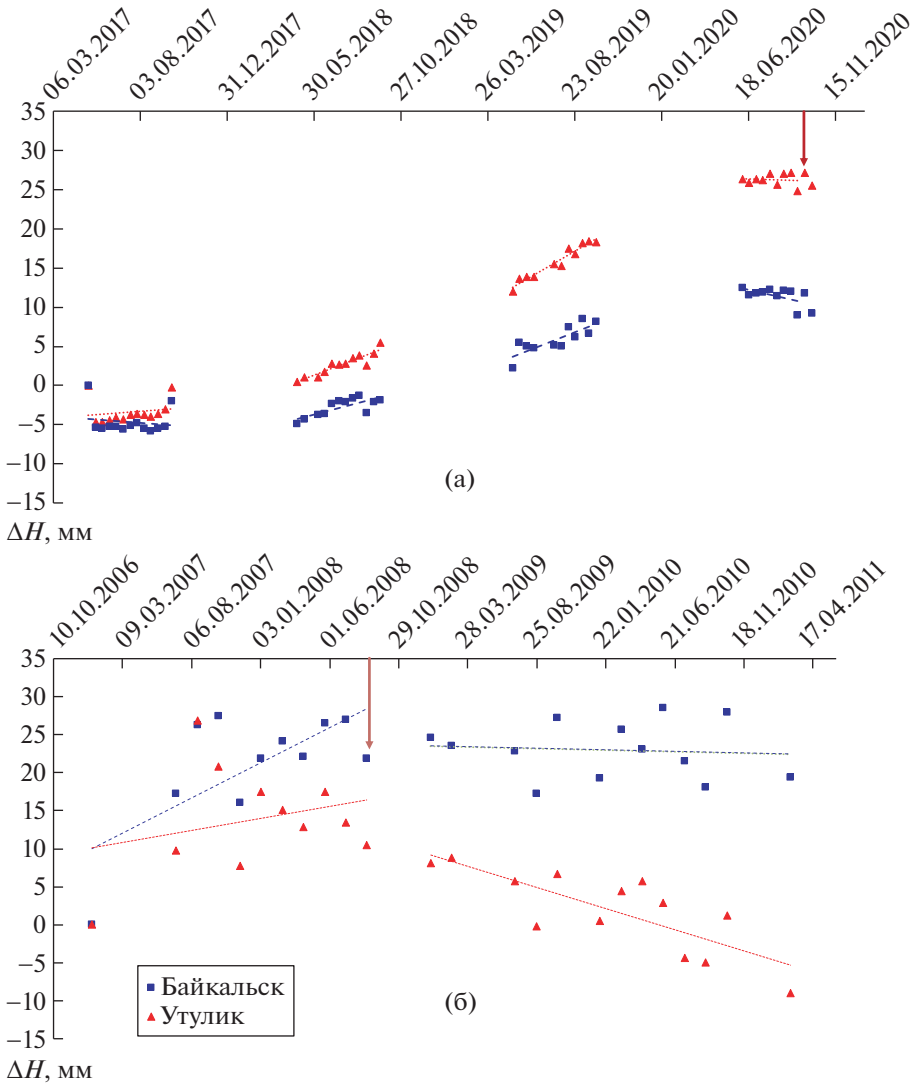

Рис. 3. Деформации смежных участков подвижной области, полученные методом PS: а – Быстринское землетрясение (Sentinel-1B, 2017–2020 гг.); б – Култукское землетрясение (ALOS-1 PALSAR-1, 2007–2011 гг.).

ны на два кластера на блоках в районе п. Утулик и г. Байкальск. В соответствии с этим разделением были получены результаты, которые представлены на рис. 3б. На графике полученные линейные тренды разделены на периоды до и после землетрясения, дата которого обозначена красной стрелкой. Анализ рис. 3б показывает, что перед рассматриваемым сейсмическим событием наблюдается общий подъем блоков с разной скоростью, а различие величин деформаций перед землетрясением достигает 12–13 мм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что после Култукского землетрясения наблюдаются изменения в динамике движения: относительная стабильность блока “Байкальск” и проседание блока “Утулик”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана картографическая основа косейсмических деформаций по данным интерферометрической пары изображений Sentinel-1B, полученных за 10 дней (11 сентября 2020 г.) до Быстринского землетрясения с магнитудой M = 5.5, состоявшегося 21 сентября 2020 г. вблизи южной оконечности озера Байкал, и через 2 дня (23 сентября 2020 г.) после этого сейсмического события. В результате комплексирования спутниковых радарных интерферометрических измерений, полученных за период времени с 06 мая 2017 по 05 октября 2020 г. для района Быстринского землетрясения, обнаружены два блока с различными скоростями положительных деформаций, происходивших до 2020 г. Начальные данные, по-

лученные в 2017 г., показывали в среднем отсутствие деформаций.

Непосредственно перед этим землетрясением (сентябрь 2020 г.) разность величин деформаций исследуемых блоков составляла порядка 14 мм. При этом результирующие за 3 года положительные деформации составляли в среднем примерно 16 и 30 мм для различных областей обнаруженных блоков. В 2020 г. после данного сейсмического события скорость поднятия блоков стабилизировалась. Такая стабилизация, возможно, является свидетельством предельного напряженно-деформированного состояния, после которого произошло землетрясение.

Аналогичные расчеты, выполненные за период времени с 01 января 2007 по 27 февраля 2011 г. для Култукского землетрясения с магнитудой $M = 6.3$, произошедшего 27 августа 2008 г., позволили выявить сопоставимые разности величин деформаций (порядка 12–13 мм) и динамику блоков перед этим сейсмическим событием. Определенное сходство динамики соответствующих блоков до землетрясений 2008 и 2020 г. позволяет предполагать сходство этой динамики и после этих сейсмических событий. Тем самым это позволяет спрогнозировать нисходящий тренд одного блока к прежнему уровню и относительную стабилизацию деформаций второго блока в период времени после землетрясения 2020 г.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности комплексного использования методов спутниковой радиолокационной интерферометрии для регистрации деформаций земной поверхности, предшествующих сейсмическим событиям. Результаты радарной интерферометрии размещены в интернете в соответствии с современными тенденциями свободного распространения научных данных (http://omdoki.nextgis.com/resource/676/display?panel = layers).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Японскому аэрокосмическому агентству (JAXA) за данные ALOS-1/2 PALSAR-1/2, предоставленные в рамках проекта ALOS-2 RA6 (PI-3402).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России ИФМ СО РАН, ГИН СО РАН и НИИ “АЭРОКОСМОС” (№ АААА-А19-119081390037-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // ДАН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.
2. *Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // ДАН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
3. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // ДАН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
4. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А, Гохберг М.Б., Родкин М.В.* Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016. № 1. С. 120–132. https://doi.org/10.7868/S000233371601004X
5. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В.* Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // ДАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
6. *Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А.* Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53. https://doi.org/10.7868/S0002333717010021
7. *Zebker H.A., Rosen P.A., Goldstein R.M., Gabriel A., Werner C.L.* On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers earthquake // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № B10. P. 19617–19634. https://doi.org/10.1029/94JB01179
8. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent Scatterers in SAR Interferometry // IEEE Trans Geosci Remote Sens. 2001. V. 39. № 1. P. 8–20. https://doi.org/10.1109/36.898661
9. *Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A.* Monitoring Mining-induced Subsidence by Integrating Differential Radar Interferometry and Persistent Scatterer Techniques // European Journal of Remote Sensing. 2020. P. 1–13. https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1759455
10. *Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н.* Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров L-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурея. // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 3–14. https://doi.org/10.31857/S0205-9614201953-14
11. *Чипизубов А.В., Смекалин О.П.* Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 936–947.
12. *Уфимцев Г.Ф., Щетников А.А., Филинов И.А.* Инверсии в новейшей геодинамике байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 7. С. 796–808.
13. *Лунина О.В.* Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и текто-

нофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434. https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215

14. *Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N., Bykov M.E., Dmitriev A.V., Kirbizhekova I.I.* Comparison of ALOS PALSAR Interferometry and Field Geodetic Leveling for Marshy Soil Thaw/freeze Monitoring, Case Study from the Baikal Lake Region, Russia. // Journal of Applied Remote Sensing. 2016. V. 10. № 1. P. 016006. https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.016006

15. *Dagurov P.N., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I.* Estimation of Snow Water Equivalent from L-band Radar Interferometry: Simulation and Experiment // International Journal of Remote Sensing, V. 41. № 24. P. 9328–9359. https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1798551

ANALYSIS OF THE BLOCK-FAULT STRUCTURE DYNAMICS IN THE AREA OF EARTHQUAKES IN 2008 AND 2020 ON THE SOUTHERN LAKE BAIKAL BY THE METHODS OF SATELLITE RADIOINTERFEROMETRY

Academician of the RAS V. G. Bondur[a, #], T. N. Chimitdorzhiev[a, b], Ts. A. Tubanov[c], A. V. Dmitriev[a], and P. N. Dagurov[a]

[a] *Scientific research Institute of aerospace monitoring "AEROCOSMOS", Moscow, Russian Federation*
[b] *Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation*
[c] *Geological institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation*
[#] *E-mail: vgbondur@aerocosmos.info*

The earth's surface displacements before and after the earthquakes that took place near the southern shore of lake Baikal on September 21, 2020 (Bystrinskoe earthquake with a magnitude $M = 5.5$) and August 27, 2008 (Kultukskoe earthquake with a magnitude $M = 6.3$) were analyzed with help of satellite radar interferometry methods. Remote sensing data obtained by the Sentinel-1B (C-band) and the ALOS-1/2 PALSAR-1/2 (L-band) spaceborne synthetic aperture radars were used to study the deformation processes. Blocks with different strain rates were found based on the results of satellite radar interferometric measurements analysis for the period from May 2017 to October 2020 for the Bystrinskoe and from January 2007 to February 2011 for the Kultukskoe earthquakes. The difference in the deformation values before the Bystrinskoe earthquake was 14 mm and before the Kultukskoe earthquake equaled from 12 to 13 mm.

Keywords: remote sensing, radiointerferometry, seismic hazards, earthquakes, stress-strain state, space monitoring