

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### АНОМАЛЬНАЯ ГЕОДИНАМИКА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 2023 г. В ТУРЦИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ 2018–2023 гг.

© 2023 г. В. Г. Бондур<sup>а, \*</sup>, Т. Н. Чимитдоржиев<sup>а, б</sup>, А. В. Дмитриев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

<sup>б</sup>Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

\*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 04.04.2023 г.

На основе результатов обработки 437 радиолокационных интерферограмм, полученных по данным радиолокатора спутника Sentinel-1 в период с начала 2018 г. до начала разрушительной сейсмической активности, произошедшей в Турции в феврале 2023 г., с использованием метода Stacking In-SAR построены поля скоростей смещения блоково-разломной структуры и выявлены основные геодинамические процессы в районе Восточно-Анатолийского разлома. Установлены аномальные смещения блоков вдоль этого разлома, которые приурочены к землетрясению с магнитудой 6.7, состоявшемуся 24 января 2020 г. С использованием кластерного анализа временных рядов полей скоростей установлены зоны напряженно деформированного состояния основных блоков, в период, предшествующий этому землетрясению. Показано, что эпицентры землетрясений, произошедших в феврале 2023 г., расположены в районе этих зон. Сделан вывод о необходимости использования такой методики для оценки напряженно деформированного состояния с целью прогнозирования сейсмоактивности.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, радиолокационная интерферометрия, землетрясения, метод взвешенного усреднения интерферограмм, Sentinel-1

DOI: 10.31857/S0205961423030090, EDN: RCCNQC

#### ВВЕДЕНИЕ

За время прошедшее после землетрясения с магнитудой 7.8, состоявшегося 6 февраля 2023 г., вдоль Восточно-Анатолийского разлома (ВАР) произошло несколько сильных землетрясений с магнитудами  $6 \leq M \leq 7.8$  и более 200 афтершоков с магнитудами  $4 \leq M < 6$  (МЧС России, 2023; Служба Срочных Донесений, 2023). В результате этой сейсмической активности в Турции погибли более 50 тыс. человек, ранены свыше 115 тыс. человек. Экономический ущерб превысил 104 млрд дол. США. На территории Сирии погибли 8.5 тыс. человек и пострадали более 14.8 тыс. человек. Как и ранее при разрушительных землетрясениях, вновь становится актуальным вопрос о решении проблемы поиска предвестников подобной аномальной сейсмической активности для прогноза и уменьшения ее катастрофических последствий (Соболев, Пономарев, 2003).

Одним из перспективных направлений проведения исследований для решения этой проблемы является использование методов и технологий дистанционного зондирования Земли из космоса, позволяющих регистрировать аномальные вариации

различных геофизических полей, возникающие в процессе подготовки и протекания сейсмических событий. При этом наиболее перспективным является совместный анализ таких аномалий, выявленных по спутниковым данным (Бондур и др., 2022а), а также комплексирование этих результатов с результатами, полученными другими методами, в том числе, с использованием данных, полученных спутниковыми навигационными системами (Бондур и др., 2007; Михайлов и др., 2010) методами геомеханического моделирования (Бондур и др., 2016а, 2016б, 2010) и др.

Одним из перспективных направлений дистанционных исследований сейсмоопасных территорий является применение методов радарной интерферометрии для оценки динамики блоково-разломной структуры (Бондур и др., 2021б; Михайлов и др., 2010). В работах (Бондур и др., 2021а, 2021б) на примере землетрясений в районе Байкальского рифта, показана стабилизация деформаций блоковой структуры (в 2020 г.) в период, предшествующий данной сейсмической активности, по сравнению с предыдущими периодами времени (2018–2019 гг.). Сделан вывод о стабилизации (сейсмодеформационном затишье)

в момент близкий к предельному напряженно-деформированному состоянию, после которого произошло землетрясение.

В настоящей работе на основе анализа радиолокационных интерферограмм, полученных по данным радиолокатора спутника Sentinel-1, в период с начала 2018 г. до сейсмической активности 2023 г. на территории Турции, исследованы поля скоростей смещений блоково-разломной структуры. На основании результатов этих исследований выявлялись зоны напряженно деформированного состояния основных блоков в районе Восточно-Анатолийского разлома в период времени, предшествующий землетрясению 2023 г. (Бондур, Воронова, 2020). Показано, что эпицентры землетрясений были расположены в районе этих зон.

### ВЫБОР МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследования, описанные в работах (Бондур и др., 2021а, 2021б) были выполнены с использованием методов интерферометрии постоянных рассеивателей (Permanent Scatterers – PS InSAR) (Ferretti et al., 2001) и малых базовых линий (Small Baseline Subset – SBAS) (Berardino et al., 2002; Феокистов и др., 2015а, 2015б). Эти методы позволяют оценивать деформации по дискретно расположенным точечным рассеивателям или площадным участкам с высокими значениями интерферометрической когерентности. Такие измерения на протяженных участках (в случае интерферометрического режима полоса радиолокационной съемки Sentinel-1 составляет 250 км) сложно интерпретировать, поскольку пространственное распределение этих точечных рассеивателей и высоко когерентных участков не равномерно. Интерполяция в промежутках между дискретными точками и небольшими фрагментами (Филатова и др., 2021) или сегментация, в том числе путем комплексирования с другими данными дистанционного радиолокационного зондирования (Бондур и др., 2022 б), эффективны в большей степени на небольших урбанизированных фрагментах, на территориях с многочисленными каменистыми уступами и другими небольшими участками с высокой когерентностью радиолокационного эхо-сигнала. Поэтому для непрерывных площадных измерений напряженно деформированного состояния земной коры следует использовать другие методы.

Современные методы дистанционного зондирования во многих случаях предполагают применение технологий обработки больших объемов спутниковых данных (Dai et al., 2018; Koyama et al., 2019; Nof et al., 2018; Sandwell and Price, 1998; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021). В настоящем исследовании также предлагается оценить динами-

ку деформаций, предшествующих землетрясению, путем обработки больших объемов радарных данных методом взвешенного усреднения интерферограмм (Stacking-InSAR) (Dai et al., 2018; 2019; Nof et al., 2018; Sandwell and Price, 1998; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021). Результаты применения этого метода сопоставимы с результатами, полученными методом малых базовых линий (Zhang et al., 2021). Так в работе (Zhang et al., 2021) на примере выявления оползней выполнено сравнение метода взвешенного усреднения интерферограмм и метода SBAS. Сделан вывод, что большинство результатов, полученных с помощью этих двух методов, согласуются. В общей сложности с использованием методов Stacking-InSAR и SBAS было выявлено 72 и 77 потенциальных оползней соответственно. Из них 67 потенциальных оползней были идентифицированы обоими методами, что указывает на их высокое совпадение (Zhang et al., 2021). Однако метод SBAS лучше идентифицирует оползни с небольшими смещениями. В то время как метод Stacking-InSAR более эффективен для обнаружения оползней при больших смещениях, а также при низкой когерентности региона исследования. Вместе с тем в работе (Xu et al., 2022) показана лучшая эффективность метода Stacking-InSAR по сравнению с методом SBAS для обнаружения деформаций земной поверхности в местах подземной добычи угля.

Как показано в работах (Dai et al., 2018; Nof et al., 2018; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021) метод Stacking-InSAR эффективен для определения динамики различных природных структур, поэтому можно предположить аналогичную эффективность при выявлении сдвигов крупных геологических структур в период, предшествующий землетрясению 2023 г. При этом по аналогии с работой (Yi et al., 2023) будем считать, что за счет усреднения множества интерферограмм нивелируется влияние атмосферы.

Ранее в работе (Weiss et al., 2020) на основе анализа результатов измерений с помощью глобальных спутниковых навигационных систем и радиолокационных интерферометрических данных, полученных со спутника Sentinel-1, за 5 летний период, начиная с 25 октября 2014 г. (состояние на эту дату принято за начало отсчета деформаций), продемонстрировано движение Анатолийской плиты против часовой стрелки на запад, относительно гигантской Евразийской плиты со скоростями различных фрагментов до 20 мм/год. В случае восходящей орбиты спутника отмечалось также разнонаправленное смещение Анатолийской и Аравийской плит вдоль Восточно-Анатолийского разлома (ВАР), соответственно к радару и от него вдоль направления обзора спутникового радара (Line of sight – LOS). Это направление для восходящей орбиты практически

**Таблица 1.** Количество развернутых интерферограмм

Год	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Количество интерферограмм	84	88	86	89	87	3
Накопительное с 2018 г.	—	172	258	347	434	437

параллельно ВАР, что позволяет фиксировать смещения вдоль него.

Принимая во внимание указанное преимущество радарных данных Sentinel-1, полученных на восходящей орбите, для оценки смещений вдоль ВАР, в настоящей работе воспользуемся этими данными для оценки напряженно-деформированного состояния перед исследуемым землетрясением. Для сравнения, временной диапазон измерений будет рассмотрен с перекрытием по времени с периодом исследований, описанных в работе (Weiss et al., 2020) – с начала 2018 г. по 4 февраля 2023 г. Это позволит выполнить сопоставление результатов интерферометрии в промежутки времени с начала 2018 г. по август 2019 г.

Метод Stacking-InSAR был первоначально предложен в работе (Sandwell and Price, 1998) как простой и эффективный метод обработки больших объемов временных рядов данных радарной интерферометрии. С помощью метода Stacking-InSAR могут быть измерены равномерные площадные смещения поверхности с точностью до нескольких мм/год, что доказано сравнением с полевыми геодезическими измерениями (Strozzi et al., 2000). Основным преимуществом этого метода является возможность получения непрерывного поля скоростей смещения практически всех пикселей изображения вдоль направления на спутник.

Суть метода сводится к суммированию взвешенных интерферометрических фаз, полученных в последовательные промежутки времени, и оценке накопленной интерферометрической фазы. Предполагается, что долговременные смещения земной поверхности соответствуют линейной зависимости, а фазовый шум (включая влияние атмосферы) является случайным во времени. Вес каждой интерферометрической пары при суммировании зависит от ее временной базы.

Рассмотрим  $N$  независимых интерферограмм с временными базами  $\Delta T_j$  ( $j = \overline{1, N}$ ) и соответствующий набор фаз  $\varphi_j$  после процедур их разворота. Среднюю скорость изменения фазы, описывающей смещения, можно записать в виде (Zhang et al., 2021)

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{j=1}^N \varphi_j \Delta T_j}{\sum_{j=1}^N \Delta T_j^2}.$$

Тогда средняя скорость деформаций вдоль линии обзора радиолокатора выражается формулой

$$v_{\text{деф}} = \lambda \bar{\varphi} / 4\pi.$$

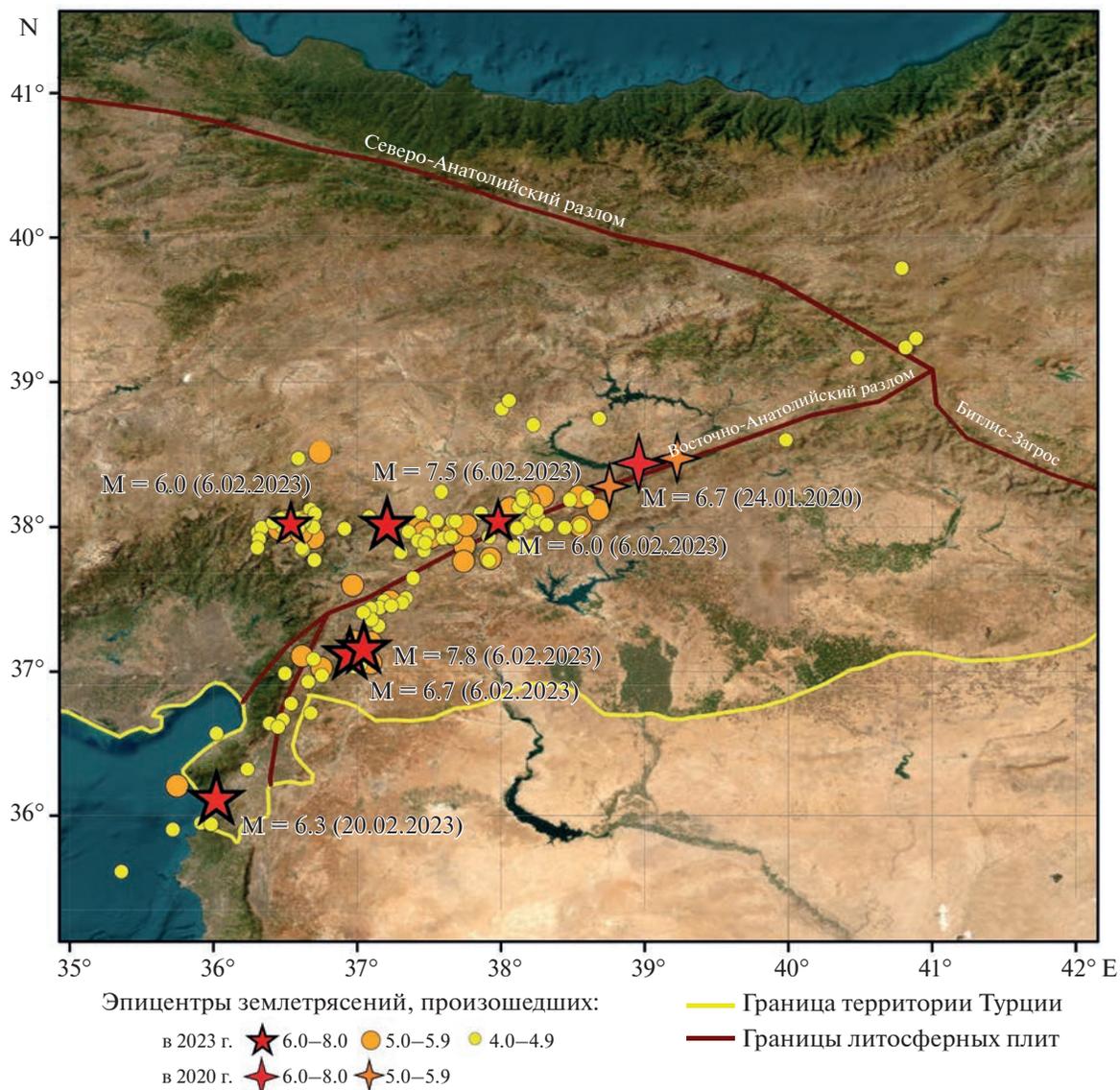
Здесь  $\lambda$  обозначает длину волны радиолокатора.

Для расчетов использовались данные радиолокатора Sentinel-1A ( $\lambda = 5.6$  см), полученные в период с 1 января 2018 г. по 4 февраля 2023 г. на восходящей орбите. Всего было обработано 437 изображений развернутой интерферометрической фазы (см. табл. 1). Скорость смещений рассчитывалась с годичным накоплением: сначала за весь 2018 г. (84 интерферограммы), затем суммарно за 2018–2019 гг. (172 интерферограммы), далее за 2018–2020 гг. (258 интерферограмм) и т.д. Все изображения были получены с относительной орбиты 116, кадр 119 с временной интерферометрической базой 12, 24 и 36 дней. Размер пространственной интерферометрической базы для данных, используемых при расчете интерферограмм, не превышал 150 м.

Для обработки больших объемов радиолокационных данных был использован современный функционал онлайн платформы Alaska Satellite Facility’s Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3) (ASF Data Search, 2023; Hogenson et al., 2020). Эта онлайн платформа предоставляет доступ к радиолокационным данным Sentinel-1. Кроме того она позволяет выбирать данные для SBAS InSAR и выполнять интерферометрическую обработку, начиная от совмещения изображений до получения развернутой фазы с помощью программного обеспечения GAMMA. Временные ряды последней с пространственным разрешением 40 м и были использованы для расчетов методом Stacking InSAR.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 представлена карта расположения эпицентров землетрясений, которые произошли на территории Турции в феврале 2023 г. с магнитудами 6.0–8.0 (обозначены красными звездочками), 5.0–5.9 (обозначены оранжевыми кружками), 4.0–4.9 (обозначены желтыми кружками), а также 24 января 2020 г. с магнитудой 6.7 (обозначено красной 4-лучевой звездочкой) и два сильных землетрясения с магнитудами в диапазоне 5.0–5.9 (обозначены оранжевыми 4-лучевыми звездочками), состоявшиеся в 2020 году (Бондур, Воронова, 2020).



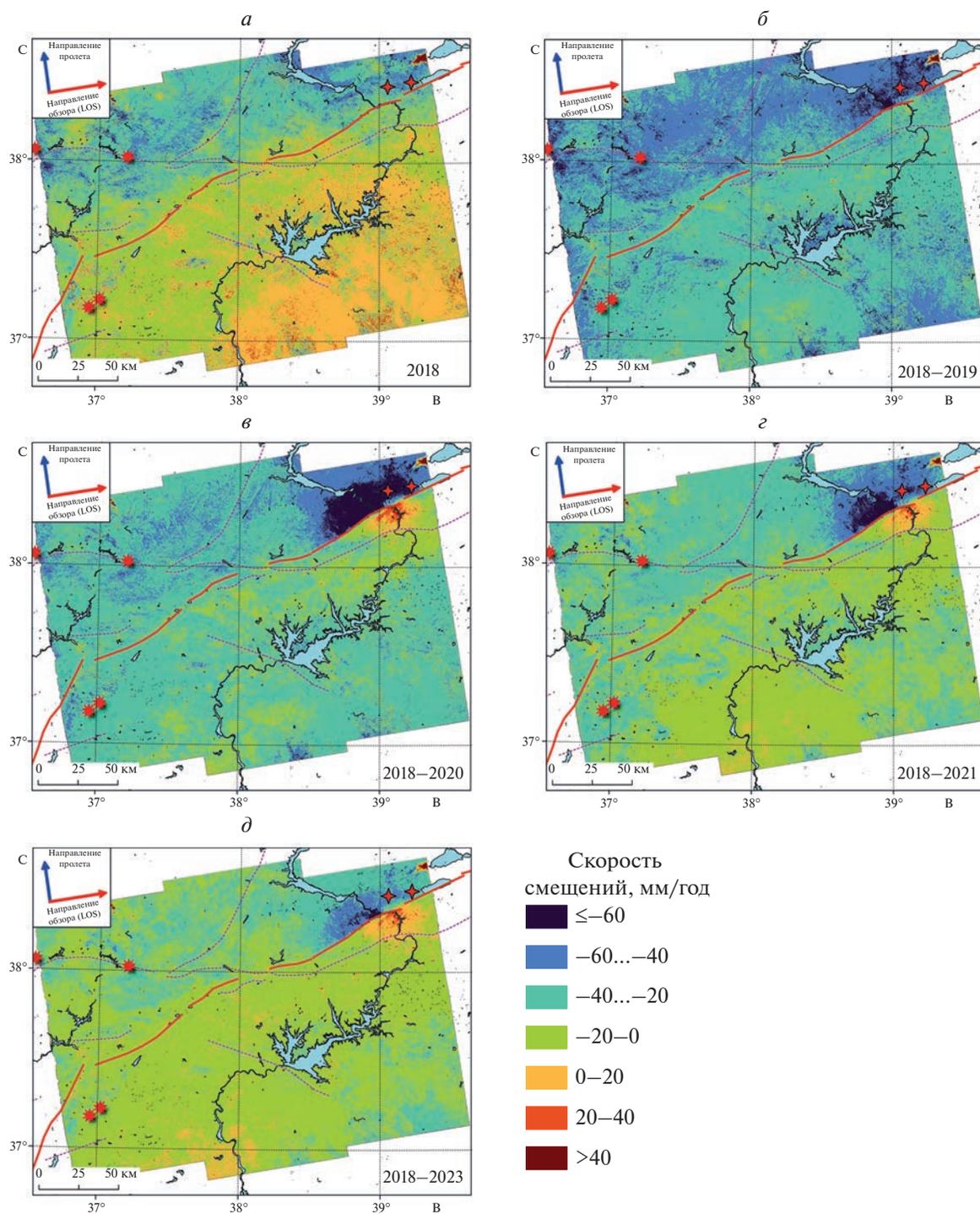
**Рис. 1.** Карта расположения эпицентров землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г. с магнитудами 6.0–8.0, 5.0–5.9, 4.0–4.9, а также 24 января 2020 г. с магнитудой 6.7 и двумя сильными землетрясениями магнитудами из диапазона 5.0–5.9, состоявшимися в 2020 году.

На рис. 2 представлены результаты расчетов полей средней скорости смещений (вдоль направления на спутник (красная стрелка в верхнем левом углу рис. 2), выполненных с использованием метода Stacking InSAR. Эпицентры землетрясений, произошедших в 2023 г., в контурах изображений, приведенных на рис. 2, обозначены 8-ми лучевыми красными звездочками в левой части. Сплошными красными линиями обозначен Восточно-Анатолийский разлом, пунктирными линиями обозначены известные глобальные геологические разломы (Styron and Pagani, 2020).

Поле скоростей за 2018 г., представленное на рис. 2, а согласуется с усредненными временными результатами за 2014–2019 гг., приведенными

в работе (Weiss et al., 2020), что является определенной валидацией полученных результатов.

Рассмотрим теперь последующие годовые периоды, для которых результаты расчетов полей средней скорости смещений представлены на рис. 2, б, в, г, д. При рассмотрении будем принимать во внимание, что измерения, описанные в работе (Weiss et al., 2020), завершились в августе 2019 г., а суммарный результат продемонстрировал смещения до 20 мм/год по всей Анатолийской плите и прилегающим территориям. На рис. 2, б показано поле скоростей (период времени 2018 и полный 2019 гг.), которое согласуется по направлению, но отличается по величинам от такового, приведенного в работе (Weiss et al., 2020).



**Рис. 2.** Поля скоростей вдоль направления LOS и интерферограмма: *а* – поле скоростей за 2018 г., *б* – за 2018–2019 гг., *в* – за 2018–2020 гг., *г* – за 2018–2021 гг., *д* – за 2018–2022 и январь–февраль 2023 г. до землетрясения.

Это означает, что изменения по величине на значительной части изображения, представленного на рис. 2, *б*, произошли в период с августа по конец декабря 2019 г. При этом максимальные скорости (черный цвет, соответствующий значениям,

более 60 мм/год) отмечались в северо-восточной части изображения, где позднее в 2020 г. произошли два крупных землетрясения (обозначены на рис. 2, *б* двумя красными 4-лучевыми звездочками в правой части изображений). Одно из этих

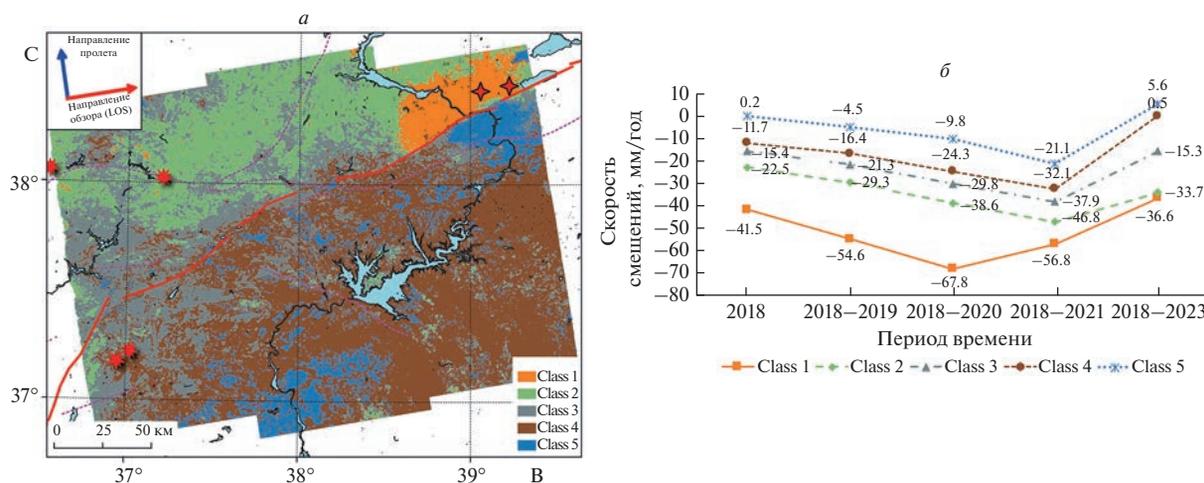


Рис. 3. Результаты кластерного анализа: *а* – пространственное распределение кластеров, *б* – временная динамика кластеров.

землетрясений с магнитудой 6.7 состоялось 24 января 2020 г. (M 6.7 earthquake in eastern Turkey, 2020).

На следующем рис. 2 в предыдущие поля скоростей смещений дополнены расчетами за 2020 г. Анализ рис. 2, *в* показал, что на участке повышенной сейсмичности аномальная геодинамика с увеличением скорости вдоль LOS в направлении на спутник продолжилась с существенным увеличением площади (черный цвет на рис. 2, *в*). При этом с южной стороны ВАР, на меньшей площади (оттенки желто-красного цвета) по сравнению с вышеописанной аномалией, увеличилась скорость смещения Аравийской плиты в противоположном направлении. Вся эта аномалия возникла в результате сейсмического события, произошедшего 24 января 2020 г. (M 6.7 earthquake in eastern Turkey, 2020).

Таким образом, в 2020 г. на небольшом участке ВАР образовался существенный градиент скоростей. Фрагмент Анатолийской плиты двигался в направлении на спутник со скоростью более 60 мм/год, а симметрично относительно ВАР фрагмент Аравийской плиты смещался в противоположном направлении со скоростью более 40 мм/год.

Судя по следующим рис. 2, *г* и 2, *д*, аномальный участок с северной стороны ВАР уменьшался, а с южной стороны ВАР в период с января 2022 г. по 4 февраля 2023 г. симметричный участок увеличивался, т.е. происходило перераспределение участков напряженно деформированного состояния.

Для дальнейшего анализа выполнена кластеризация изображений, представленных на рис. 2, известным методом Isodata. Для этого было сформировано соответствующее 5-канальное изобра-

жение: 1 канал – поле скоростей за 2018 г., 2 канал – поле скоростей за 2018–2019 гг. и т.д. В качестве основного входного параметра было указано количество кластеров от 5 до 10.

В итоге применения процедуры кластеризации было получено пространственное распределение поля скоростей на кластеры, которое приведено на рис. 3, *а*. На рис 3, *б* приведена временная динамика средней скорости этих кластеров. Цвета обозначающие кластеры на рис. 3, *а* и 3, *б* совпадают. Как отмечалось выше, это относительная скорость смещений, которая рассчитывалась по отношению к январю 2018 г.

Пространственное распределение кластеров, приведенное на рис. 2, *а*, будем интерпретировать как отдельные блоки земной коры, перемещающиеся с различными скоростями. Оранжевым цветом обозначен class 1 – это аномальный участок черного цвета на рис. 2, который интенсивнее по сравнению с другими смещается вдоль направления LOS на спутник (см. линию оранжевого цвета на рис. 3, *б*). Максимальная скорость (по модулю) этого блока доходила до 67.8 мм/год за период 2018–2020 гг. Таким образом фактически произошло косейсмическое увеличение скорости в 2020 г.

В последующие годы скорость этого блока снижалась, что, по-видимому, связано с передачей части импульса соседним блокам с соответствующим увеличением их скорости. Этот эффект примечателен постепенной передачей импульса и объединением с блоковой структурой class 2 (зеленого цвета на рис. 3), т.к. в момент, предшествующий землетрясению эти два блока двигались одинаково. Различия в скоростях этих блоков (36.3 и 33.7 мм/год), перед землетрясением, не превышали значение 4 мм/год, которое,

согласно работе (Strozzi et al., 2000), является средней величиной невязки между результатами полевых геодезических измерений и дистанционных интерферометрических измерений при помощи Stacking InSAR. Совместное движение этих блоков с равной скоростью означает отсутствие между ними напряженно – деформированного состояния в 2022 г. и период, предшествующий землетрясению 2023 г.

Аналогичным образом, в период 2022–2023 гг. перед землетрясением, существенно уменьшилось различие скоростей (до 5.1 мм/год) для class 4 и 5 (коричневый и синий цвета на рис. 2) по сравнению с предыдущими периодами времени (10–14 мм/год). При этом оба блока стали двигаться в направлении от спутника, относительно временной точки отсчета – начала 2018 г. Примечательно, что, ранее блоки, соответствующие классам class 3 и class 4 (серый и коричневый цвета на рис. 3), имели величины скоростей с различием 5.8 мм/год.

Из анализа описанных геодинамических процессов следует, что в период времени перед землетрясением, состоявшемся 6 февраля 2023 г. ( $M = 7.6$ ), наибольшие различия скоростей смещений вдоль LOS возникли между указанными парами классов (1 и 2, а также 4 и 5) и блоком class 3 (серый цвет на рис. 3). Это означает, что возникло напряженно – деформированное состояние между блоком, соответствующим class 3, и другими блоками. В тоже время наибольшее различие скоростей отмечается для пар class 1–2 и class 4–5. Однако принимая во внимание историческую разнонаправленность геодинамики этих блоков (фрагментов Анатолийской и Аравийской плит) вдоль ВАР (Weiss et al., 2020), можно считать, что эта историческая геодинамика сохраняется. Тогда севернее ВАР возникало напряженно-деформированное состояние в северо-западной части за счет подпора совокупности блоков class 1 (оранжевый) и 2 (зеленый цвет) на блок class 3 (серый цвет). А южнее ВАР объединенный блок 4–5 (коричневый и синий цвета) сдвигается в восточную сторону удаляясь от блока class 3 в юго-западной части изображения. Это свидетельствует о том, что здесь возникало напряженно – деформированное состояние за счет растяжения. Именно в этой части территории 6 февраля 2023 г. произошел первый сейсмический толчок магнитудой 7.8, который послужил триггером для других толчков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате использования современных технологий обработки больших объемов радиолокационных интерферометрических данных (437 интерферограмм за период с 2018 по 4 февраля 2023 г.) на основе применения метода Stacking InSAR бы-

ли построены временные поля скоростей смещений блоковой структуры в районе аномальной по разрушительности серии землетрясений, произошедших в феврале 2023 г. на территории Турции. С их помощью были выявлены аномальные смещения вдоль Восточно-Анатолийского разлома, которые вызваны землетрясением магнитудой 6.7, состоявшемся 24 января 2020 г.

С использованием кластерного анализа временных рядов полей скоростей в период времени, предшествующий разрушительному землетрясению 6 февраля 2023 г. магнитудой 7.8, были выявлены зоны напряженно – деформированного состояния основных блоков. Установлено, что фрагменты Анатолийской плиты на границе ВАР имели различные скорости смещений, что в свою очередь образовало зону сжатия к северо-западу от ВАР и зону растяжения к юго-западу от ВАР. В районе этих участков и были расположены эпицентры последующих сейсмических событий, которые в феврале 2023 г. привели к катастрофическим последствиям на территориях Турции и Сирии.

Таким образом, полученные результаты показывают необходимость использования методики оценки напряженно деформированного состояния с целью прогнозирования сейсмоактивности.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания НИИ “Аэрокосмос” № 122011800095-3 и ИФМ СО РАН № 121032500022-8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Воронова О.С. Исследования тепловых полей перед сильными землетрясениями в Турции 8 марта 2010 г. ( $M = 6.1$ ) и 24 января 2020 г. ( $M = 6.7$ ) // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 6. С. 3–16. <https://doi.org/10.31857/S0205961420060032>
- 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 (а). № 1. С. 120–132. <https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 2016 (б). Т. 466. № 5. С. 598–601. <https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- 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 // Докл. АН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- 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 крупней-

ших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // Докл. АН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.

Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Совместный анализ аномальных вариаций различных геофизических полей по космическим данным при подготовке землетрясения в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 Г. (M = 5.6) // Исслед. Земли из космоса. 2022 (а). № 5. С. 3–19. <https://doi.org/10.31857/S0205961422050049>

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Оценка реактивации оползня на реке Буряя методами радарной интерферометрии // Докл. АН. Науки о Земле. 2022 (б). Т. 502. № 2. С. 83–89. <https://doi.org/10.31857/S2686739722020025>

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Методы радарной интерферометрии и обработки оптических спутниковых изображений для исследования негативных воздействий на окружающую среду (на примере Байкальского ЦБК). // Исслед. Земли Из Космоса. 2021(а). № 5. С. 3–14. <https://doi.org/10.31857/S020596142105002X>

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 г. на Южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии // Докл. АН. Науки О Земле. 2021 (б). Т. 499. С. 144–150. <https://doi.org/10.31857/S268673972108003X>

Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н. М., Киселева Е. А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.

МЧС России [Электронный ресурс], URL: <https://mchs.gov.ru/> (дата обращения 28 марта 2023). Служба Срочных Донесений [Электронный ресурс], URL [http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd\\_news.htm](http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm) (дата обращения 28 марта 2023).

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003, 270 с.

Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля SBAS программного пакета SARSCAPE и данных PCA ASAR/ENVISAT и PAL-SAR/ALOS. Часть 1. Ключевые моменты метода. // Журн. Радиоэлектроники. 2015а. № 9. С. 13. URL <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/1/text.pdf>.

Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля SBAS программного пакета SARSCAPE и данных PCA ASAR/ENVISAT и PAL-SAR/ALOS. Часть 2. Экспериментальные результаты // Журн. Радиоэлектроники. 2015б. № 9. С. 14. URL <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/2/text.pdf>.

Филатова В.М., Назаров И.В., Филатов А.В. Методы и результаты геостатистической обработки радарной интерферометрии на территории Калининградской области // Современные Проблемы ДЗЗ Из Космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 74–82. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-74-82>

ASF Data Search [Электронный ресурс], URL <https://search.asf.alaska.edu/#/> (дата обращения 28 марта 2023).

Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>

Dai K., Liu G., Li Z., Ma D., Wang X., Zhang B., Tang J., Li G. Monitoring Highway Stability in Permafrost Regions with X-band Temporary Scatterers Stacking InSAR // Sensors. 2018. V. 18. P. 1876. <https://doi.org/10.3390/s18061876>

Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. V. 39. P. 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>

Hogenson K., Kristenson H., Kennedy J., Johnston A., Rine J., Logan T., Zhu J., Williams F., Herrmann J., Smale J., Meyer F. Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-native infrastructure for generic processing of SAR data. 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6917373>

Koyama C.N., Watanabe M., Hayashi M., Ogawa T., Shimada M. Mapping the spatial-temporal variability of tropical forests by ALOS-2 L-band SAR big data analysis // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 233. P. 111372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111372>

M 6.7 earthquake in eastern Turkey, 2020, [Электронный ресурс], URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us60007ewc/executive> (дата обращения 28 марта 2023)

Nof R.N., Baer G., Eyal Y., Novali F. Current surface displacement along the Carmel Fault system in Israel from InSAR stacking and PSInSAR // Israel J. Earth Sciences. 2008. V. 57. № 2. P. 71–86. <https://doi.org/10.1560/IJES.57.2.71>

Sandwell D.T., Price E.J. Phase gradient approach to stacking interferograms // J. Geophysical Research: Solid Earth. 1998. V. 103. P. 30183–30204. <https://doi.org/10.1029/1998JB900008>

Strozzi T., Wegmuller U., Werner C., Wiesmann A. Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy // IGARSS 2000 Proceedings (Cat. No.00CH37120). 2000. P. 2239–2241. V. 5. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2000.858368>

Styron R., Pagani M. The GEM Global Active Faults Database // Earthquake Spectra. 2020. V. 36. P. 160–180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>

Weiss J.R., Walters R.J., Morishita Y., Wright T.J., Lazecky M., Wang H., Hussain E., Hooper A.J., Elliott J.R., Rollins C., Yu C., González P.J., Spaans K., Li Z., Parsons B. High-Resolution Surface Velocities and Strain for Anatolia From Sentinel-1 InSAR and GNSS Data // Geophysical Research Letters.

2020. V. 47. P. e2020GL087376.

<https://doi.org/10.1029/2020GL087376>

Xu Y., Li T., Tang X., Zhang X., Fan H., Wang Y. Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. P. 3314.

<https://doi.org/10.3390/rs14143314>

Yi Y., Xu X., Xu G., Gao H. Rapid Mapping of Slow-Moving Landslides Using an Automated SAR Processing Platform (HyP3) and Stacking-InSAR Method // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. P. 1611.

<https://doi.org/10.3390/rs15061611>

Zhang L., Dai K., Deng, J. Ge D., Liang R., Li W., Xu Q. Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. P. 3662.

<https://doi.org/10.3390/rs13183662>

## Anomalous Geodynamics before the 2023 Earthquake in Turkey According to Radar Interferometry 2018–2023

V. G. Bondur<sup>1</sup>, T. N. Chimitdorzhiev<sup>2</sup>, and A. V. Dmitriev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Displacement velocity fields of the block–fault structure are constructed and the main geodynamic processes in the area of the East Anatolian fault are revealed based on the results of processing of 437 radar interferograms obtained from the Sentinel-1 radar in the period from the beginning of 2018 to disastrous seismic activity in February 2023 in Turkey by Stacking InSAR method. Anomalous block displacements along this fault have been identified, which are timed to the earthquake of January 24, 2020 (M = 6.7). Zones of stress-strain state of the main blocks in the period preceding the earthquake have been established using cluster analysis of time series of velocity fields. It is shown that the epicenters of February 2023 earthquakes are located in these zones. It is concluded that it is necessary to use such a technique to assess the stress-strain state in order to predict seismic activity.

*Keywords:* radar interferometry, earthquake, Stacking-InSAR, Sentinel-1

### REFERENCES

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Assessment of the Bureya River Landslide Reactivation Using the Persistent Scatterer Interferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 502. P. 1–2. P. 31–36. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22020027>

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Methods of Radar Interferometry and Optical Satellite Image Processing to Study Negative Effects on the Environment (a Case Study of the Baikalsk Pulp and Paper Mill) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021a. V. 57. № 12. P. 1527–1536. <https://doi.org/10.1134/S0001433821120045>

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Tubanov Ts.A., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Analysis of the Block-Fault Structure Dynamics in the Area of Earthquakes in 2008 and 2020 near Southern Lake Baikal by the Methods of Satellite Radiointerferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 499. P. 2. P. 648–653. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21080031>

EMERCOM of Russia, available at: <https://en.mchs.gov.ru/> (accessed: March 28, 2023).

FRC RAS Geophysical survey, available at: [http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd\\_news.htm](http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm) (accessed: March 28, 2023).

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V. The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismic-

ity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016. V. 52. № 1. P. 117–128.

<https://doi.org/10.1134/S1069351316010043>

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B. Large scale interaction of seismically active tectonic provinces: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 466. № 2. P. 183–186.

<https://doi.org/10.1134/S1028334X16020100>

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V. Connection between variations of the stress-strain state of the Earth's crust and seismic activity: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. Part 1. P. 147–150.

<https://doi.org/10.1134/S1028334X10010320>

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblov G.M., Shalimov S.L. Geomechanical models and ionospheric variations related to strongest earthquakes and weak influence of atmospheric pressure gradients // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 414. № 4. P. 666–669.

<https://doi.org/10.1134/S1028334X07040381>

Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Combined Analysis of Anomalous Variations in Various Geophysical Fields during Preparation of the M5.6 Earthquake near Lake Baikal on September 22, 2020, Based on Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022. V. 58. № 12. P. 1532–1545.

<https://doi.org/10.1134/S0001433822120052>

Bondur V.G., Voronova O.S. Study of Thermal Fields before Strong Earthquakes in Turkey on March 8, 2010 (M = 6.1),

- and January 24, 2020 (M = 6.7) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 9. P. 991–1002. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090425>
- Feoktistov A.A., Zakharov A.I., Gusev M.A., Denisov P.V.* Issledovanie vozmozhnostei metoda malykh bazovykh linii na primere modulya SBAS programmnoho paketa SAR-SCAPE i dannykh RSA ASAR/ENVISAT i PALSAR/ALOS. Chast' 1. Klyuchevye momenty metoda (Investigation of the possibilities of the small baseline method using the example of the SBAS module of the SARSCAPE software package and ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS SAR data. Part 1. Key points of the method) // *Zhurnal Radioelektroniki*. 2015a. № 9. P. 13. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/1/text.pdf>.
- Feoktistov A.A., Zakharov A.I., Gusev M.A., Denisov P.V.* Issledovanie vozmozhnostei metoda malykh bazovykh linii na primere modulya SBAS programmnoho paketa SARSCAPE i dannykh RSA ASAR/ENVISAT i PALSAR/ALOS. Chast' 2. Eksperimental'nye rezul'taty (Investigation of the possibilities of the small baseline method using the example of the SBAS module of the SARSCAPE software package and ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS SAR data. Part 2. Experimental results) // *Zhurnal Radioelektroniki*. 2015b. № 9. P. 14. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/2/text.pdf>.
- Filatova V.M., Nazarov I.V., Filatov A.V.* Metody i rezul'taty geostatisticheskoi obrabotki radarnoi interferometrii na territorii Kaliningradskoi oblasti (Methods and results of geostatistical processing of radar interferometry data over Kaliningrad Region territory) // *Sovremennye Problemy DZZ Iz Kosmosa*. 2021. V. 18. № 5. P. 74–82. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-74-82>
- ASF Data Search, available at: <https://search.asf.alaska.edu/#/> (accessed: March 28, 2023).
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Dai K., Liu G., Li Z., Ma D., Wang X., Zhang B., Tang J., Li G.* Monitoring Highway Stability in Permafrost Regions with X-band Temporary Scatterers Stacking InSAR // *Sensors*. 2018. V. 18. P. 1876. <https://doi.org/10.3390/s18061876>
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* V. 39. P. 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Hogenson K., Kristenson H., Kennedy J., Johnston A., Rine J., Logan T., Zhu J., Williams F., Herrmann J., Smale J., Meyer F.* Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-native infrastructure for generic processing of SAR data. 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6917373>
- Koyama C.N., Watanabe M., Hayashi M., Ogawa T., Shimada M.* Mapping the spatial-temporal variability of tropical forests by ALOS-2 L-band SAR big data analysis // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 233. P. 111372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111372>
- M 6.7 earthquake in eastern Turkey, 2020, available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/us60007ewc/executive> (accessed: March 28, 2023)
- Mikhailov V.O., Nazaryan A.N., Smirnov V.B., Kiseleva E.A., Tikhotskii S.A., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Polyakov S.A., Diamant M., Shapiro N.* Joint inversion of the differential satellite interferometry and GPS data: A case study of ALTAI (CHUIA) earthquake of september 27, 2003 // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010. T. 46. № 2. C. 91–103.
- Nof R.N., Baer G., Eyal Y., Novali F.* Current surface displacement along the Carmel Fault system in Israel from InSAR stacking and PSInSAR // *Israel J. Earth Sciences*. 2008. V. 57. № 2. P. 71–86. <https://doi.org/10.1560/IJES.57.2.71>
- Sandwell D.T., Price E.J.* Phase gradient approach to stacking interferograms // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1998. V. 103. P. 30183–30204. <https://doi.org/10.1029/1998JB900008>
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletraseniy i predvestniki (Earthquake physics and precursors). Moscow: Nauka, 2003. P. 270 p. (In Russian).
- Strozzi T., Wegmuller U., Werner C., Wiesmann A.* Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy // *IGARSS 2000 Proceedings (Cat. No.00CH37120)*. 2000. P. 2239–2241 V. 5. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2000.858368>
- Styron R., Pagani M.* The GEM Global Active Faults Database // *Earthquake Spectra*. 2020. V. 36. P. 160–180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>
- Weiss J.R., Walters R.J., Morishita Y., Wright T.J., Lazecky M., Wang H., Hussain E., Hooper A.J., Elliott J.R., Rollins C., Yu C., González P.J., Spaans K., Li Z., Parsons B.* High-Resolution Surface Velocities and Strain for Anatolia From Sentinel-1 InSAR and GNSS Data // *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. P. e2020GL087376. <https://doi.org/10.1029/2020GL087376>
- Xu Y., Li T., Tang X., Zhang X., Fan H., Wang Y.* Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. P. 3314. <https://doi.org/10.3390/rs14143314>
- Yi Y., Xu X., Xu G., Gao H.* Rapid Mapping of Slow-Moving Landslides Using an Automated SAR Processing Platform (HyP3) and Stacking-InSAR Method // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. P. 1611. <https://doi.org/10.3390/rs15061611>
- Zhang L., Dai K., Deng, J. Ge D., Liang R., Li W., Xu Q.* Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. P. 3662. <https://doi.org/10.3390/rs13183662>