

ВЫЯВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ МЕТОДАМИ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ НА ПРИМЕРЕ ПОЛУОСТРОВА КРЫМ

© 2026 г. Р. С. Османов^{1,*}, М. С. Волкова¹, В. О. Михайлов¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Российская Федерация

*E-mail: osmanovrustam135@gmail.com

Поступила в редакцию 25.02.2026 г.

После доработки 17.03.2026 г.

Принята к публикации 19.03.2026 г.

В статье представлены результаты мониторинга смещений на обширной территории полуострова Крым за период с 2020 по 2024 г., выполненного по снимкам спутника, оснащенного радаром с синтезированной апертурой (РСА). Анализ полей смещений и их интерпретация проведены как в региональном, так и в локальном масштабах. Получено, что 99% (3σ) значений средней скорости смещений поверхности меняется в диапазоне от -23 до $+23$ мм/год. В региональной компоненте поля средних скоростей смещений прослеживается блоковая структура, согласующаяся с положением ряда активных тектонических разломов. Динамика полученных по данным РСА-интерферометрии региональных отрицательных и положительных смещений согласуется с известной из тектонических схем тенденцией опускания Сивашской впадины и подъема Керченской возвышенности.

Обсуждаются причины локальных процессов природного или техногенного происхождения, выявленных на отдельных территориях. В локальном масштабе с помощью предложенного в статье алгоритма поиска аномальных областей деформаций выявлен 61 полигон площадью от 0.1 до 2.3 км², среди которых особенное значение имеют районы, затронутые оползневыми процессами. Исследована динамика движения отдельных оползневых масс.

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность радарной интерферометрии для решения широкого класса как фундаментальных, так и практических задач, в том числе связанных с вопросами экологии и безопасности населения.

Ключевые слова: РСА-интерферометрия, Sentinel-1, SBAS, ГНСС, временные ряды смещений, мониторинг, Крым, оползни

DOI: 10.7868/S3034645226030072

ВВЕДЕНИЕ

Технология спутниковой интерферометрии, основанная на применении радаров с синтезированной апертурой (РСА), получила распространение для решения широкого класса задач с начала 90-х гг. Развиваются методы обработки спутниковых данных для построения цифровых моделей рельефа местности, наблюдения смещений земной поверхности, связанных с техногенными или природными процессами, изучения вулканических и сейсмических про-

цессов, медленных тектонических движений и др. [Massonnet, Feigl, 1998; Bürgmann et al., 2000; Hansen, 2001; Hooper et al., 2012; и многие др.]. Для мониторинга земной поверхности незаменимая информация, которую можно извлечь из спутниковых данных методами РСА-интерферометрии, — это карты смещений и скоростей смещений поверхности на обширных территориях, получаемые с высоким разрешением и высокой плотностью покрытия. В зависимости от целей и задач по охвату площади наблюдений

можно выделить локальный и региональный мониторинги. В задачах локального мониторинга, как правило, район исследования привязан к конкретным объектам: вулканическому массиву, эпицентральной зоне землетрясения, оползневым склонам, разрабатываемым месторождениям, шахтам, тоннелям, строительным объектам, а также расположенным в окрестности с объектами мониторинга населенным пунктам. Часто такие объекты располагаются в районах, труднодоступных для наземных методов исследования. Для изучения геодинамических процессов, например определения медленных движений земной коры, в том числе вдоль тектонических разломов, проводится региональный мониторинг на большой территории, которую трудно охватить наземными методами. Поэтому часто при изучении полей смещений в труднодоступных или опасных районах, а также на очень больших территориях, технологии РСА-интерферометрии становятся незаменимыми.

В работе по данным спутниковой РСА-интерферометрии выполнен мониторинг обширной территории полуострова Крым, уникального и сложного объекта в тектоническом и геологическом отношении. Многими авторами изучались различные процессы, сопровождаемые деформациями земной поверхности полуострова (геодинамические, сейсмические, процессы, связанные с грязевым вулканизмом, эрозионные, оползневые) [Smolyaninova et al., 1996; Юдин, 2001; Юдин, Юровский, 2011; Сим и др., 2025; Дударов и др., 2022; и др.], но опубликованных работ об определении смещений методами радарной интерферометрии найти не удалось.

Особенно важным становится мониторинг Крымского полуострова из-за нарастающей активности экзогенных геологических процессов. В частности, выявление и мониторинг оползневых процессов на территории Крыма — задача крайне сложная, которую очень трудно, если вообще возможно, выполнить без использования дистанционных методов. По данным [Отчет о результатах..., 2023], в 2023 г. были обследованы 237 объектов опасных эрозионно-геологических процессов, при этом сообщается, что в “Кадастр оползней Крыма” занесено 1603 оползня (221 в Северном районе, 1062 в Южном, 281 в Восточном и 39 в Западном районе).

По спутниковым радарным снимкам нами впервые получены данные о смещениях земной поверхности всей территории полуострова площадью около 27 тыс. км² с 2020 по 2024 г. Рассчитано поле средних скоростей смещений вдоль линии распространения радарного сигнала (LOS — Line of Sight) и накопленные смещения на дату съемки каждого радарного снимка, участвующего в обработке.

Сложностью исследования больших территорий с целью выявления смещений поверхности и наблюдения динамики развития различных процессов является разномасштабность зон деформаций. В связи с этим разработан алгоритм поиска локальных аномальных областей смещений. Проведен анализ и интерпретация смещений как в региональном масштабе всей территории полуострова, так и в масштабе локальных процессов природного или техногенного происхождения, выявленных на малых территориях площадью от 0.1 км².

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования

Полуостров Крым — это обширная территория, для разных частей которой характерно существенно различное геологическое и тектоническое строение. Большую роль в формировании современной структуры полуострова играют активные тектонические разломы [Бачманов и др., 2017]. Контрастный рельеф сочетает обширные равнинные территории и три гряды горных хребтов. По типу рельефа полуостров разделяют на степной (северная часть) и горный Крым (южная часть).

Горный Крым и прибрежная зона характеризуются высокой активностью экзогенных геологических процессов. Почти на всем Южнобережье распространены оползни, обвалы и осыпи, абразионные и эрозионные процессы, часты селевые потоки. Причем многие оползни имеют техногенное происхождение [Агаркова-Лях, Лях, 2020; Юдин, 2001]. Интерпретации современной геодинамической позиции Крыма весьма противоречивы. Известна точка зрения, в соответствии с которой полуостров расположен над зоной субдукции (точнее, псевдосубдукции) [Юдин, 2011]. Согласно этим представлениям, происходит пододвигание

литосферы Черноморской впадины под Горный Крым, которое сопровождается формированием надвигов и ростом горного сооружения. Альтернативные представления трактуют южную горную часть Крымского полуострова как крайний сегмент Крымско-Кавказского орогена, в формировании современного геоморфологического облика которого определяющую роль играет крупноамплитудная транспрессионная Крымско-Кавказско-Копетдагская зона правого сдвига [Patina et al., 2017; Кузнецов, Романюк, 2025].

Вертикальный рост Крымских гор по геодезическим данным происходит со скоростью от 2 до 6 мм/год [Юдин, Юровский, 2011]. О современной геодинамической активности в том числе свидетельствует сейсмичность южной части региона. Степной Крым, напротив, характеризуется очень низкой сейсмичностью. С 1972 по 2023 г. на территории Степного Крыма зарегистрировано всего 41 слабое землетрясение. Анализ сейсмичности выполнен в работе [Сим, Гордеев, Сычева, 2025]. Также в тыловой (северной) части территория Степного Крыма испытывает медленное прогибание.

Данные РСА-интерферометрии

Для мониторинга Крымского полуострова применена технология радарной интерферометрии, основанная на использовании данных, полученных спутниковой системой Европейского космического агентства (ЕКА) Sentinel-1A, оснащенной радаром с синтезированной апертурой. Используются радарные изображения, выполненные в режиме IW (Interferometric Wide Swath) с вертикальной поляризацией излучения и приема сигнала (VV). Снимки представлены в формате SLC (Single Look Complex) с пространственным наземным разрешением $\sim 5 \times 20$ м. Съемка осуществлялась на восходящей орбите №14 (спутник движется с юга на север и излучает радарный сигнал на восток от траектории полета). Период наблюдений — с 08.01.2020 г. по 24.12.2024 г. включительно. За это время Sentinel-1A обеспечил регулярную съемку с интервалом 12 суток. В результате было получено 146 сцен, из которых сформировано 683 интерферограммы (рис. 1а и 1б), на основе которых методом малых базовых линий SBAS (Small BAseline Subsets) рассчитаны поля сред-

них скоростей смещений поверхности, а также поля накопленных смещений от начала съемки до даты очередного снимка.

Методы обработки серии большого количества снимков при корректном учете атмосферных эффектов и подавлении шумов позволяют получать временные ряды смещений и определять средние скорости смещений с точностью в первые мм/год, как показано в работах [Casu et al., 2006; Ferretti et al., 2007]. Более подробно с методами обработки радарных данных и основами интерферометрии можно ознакомиться, например, в монографиях [Massonnet, Feigl, 1998; Hanssen, 2001; Ferretti, 2014; и др.].

Для обеспечения наилучшей когерентности изображений ограничение пространственной базовой линии было задано 150 м, а временной — 48 дней. Для учета топографии выбрана глобальная цифровая модель рельефа ALOS World 3D (AW3D30) с пространственным разрешением 30 м. Учет атмосферных помех выполнен по картам фазовых атмосферных задержек сервиса GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service) [Yu et al., 2018], кроме того, в процессе обработки использовалась пространственно-временная фильтрация остаточной компоненты атмосферной помехи. Детально вопросы учета поправок рассмотрены в работе [Волкова и др., 2024].

Поскольку временной ряд содержит сезонную компоненту, ряд накопленных смещений был аппроксимирован линейно-периодической функцией:

$$\text{Disp}(t) = V_{\text{LOS}} \cdot t + A_1 \cos(2\pi F \cdot t + A_2), \quad (1)$$

где: V_{LOS} — средняя скорость смещений за период съемки (мм/год); A_1 — амплитудная модуляция годовой гармоники (мм); A_2 — начальная фаза; F — частота колебаний, в данном случае 1/год (учитывается сезонная компонента с годовым периодом); t — временной отсчет от даты первой съемки (годы).

Напомним, что радиолокатор фиксирует изменение расстояния от спутника до отражающего объекта вдоль линии распространения электромагнитной волны (LOS). В этом же направлении, которое будем обозначать U_{LOS} , определяются смещения методами РСА-интерферометрии.

Геокодирование полученного набора данных осуществлялось на географическую сетку координат с шагом 0.000125° (15 м). Обработка выполнена в программном комплексе SARscape.

Методы анализа результатов

Для определения региональных смещений, связанных с медленными движениями блоков земной коры, мы ограничились визуальным анализом полученного поля средних скоростей смещений и построением временных рядов накопленных смещений в отдельных точках. Для выявления локальных процессов на больших территориях применен автоматизированный алгоритм поиска областей аномальных смещений в скользящем окне.

Алгоритм, прежде всего, ориентирован на выявление оползневых процессов на горных склонах и позволяет определить контуры деформационной зоны, геометрические параметры и зональные статистические характеристики используемых в расчете физических величин.

Краткое описание алгоритма. Исходные данные для расчета — это результаты обработки серии радарных снимков методом SBAS: карта

средних скоростей смещений V_{LOS} (мм/год), карта точности оценки средней скорости смещений σ_v (мм/год), карта амплитуды сезонной компоненты A_1 (см. формула (1)). Все величины определены в каждом пикселе (i, j) координатной сетки пространства размерности $N_x \times N_y$ ($N_x = 28797$, $N_y = 16657$ пикселей). Точность средней скорости смещений оценивалась по формуле взаимосвязи дисперсии фазы с когерентностью, выведенной авторами работы [Rodriguez, Martin, 1992]: $\sigma_v = \sqrt{(1 - \gamma^2) / (2\gamma^2)} \cdot \lambda / (4\pi) \cdot M \cdot \Delta T$, (здесь: M — количество интерферограмм; ΔT — временной интервал за весь период наблюдений; λ — длина волны радарного сигнала; γ — когерентность). Также используется цифровая модель рельефа местности.

На первом этапе для подавления общей региональной компоненты и повышения контраста рассчитывается карта остаточной скорости смещений:

$$V_{res} = V_{LOS} - v_m, \quad (2)$$

где v_m — медианное значение средней скорости смещений (V_{LOS}) для каждого пикселя в радиусе 5 км. Затем отбираются все пиксели-кандидаты, окрестность которых предполагает наличие

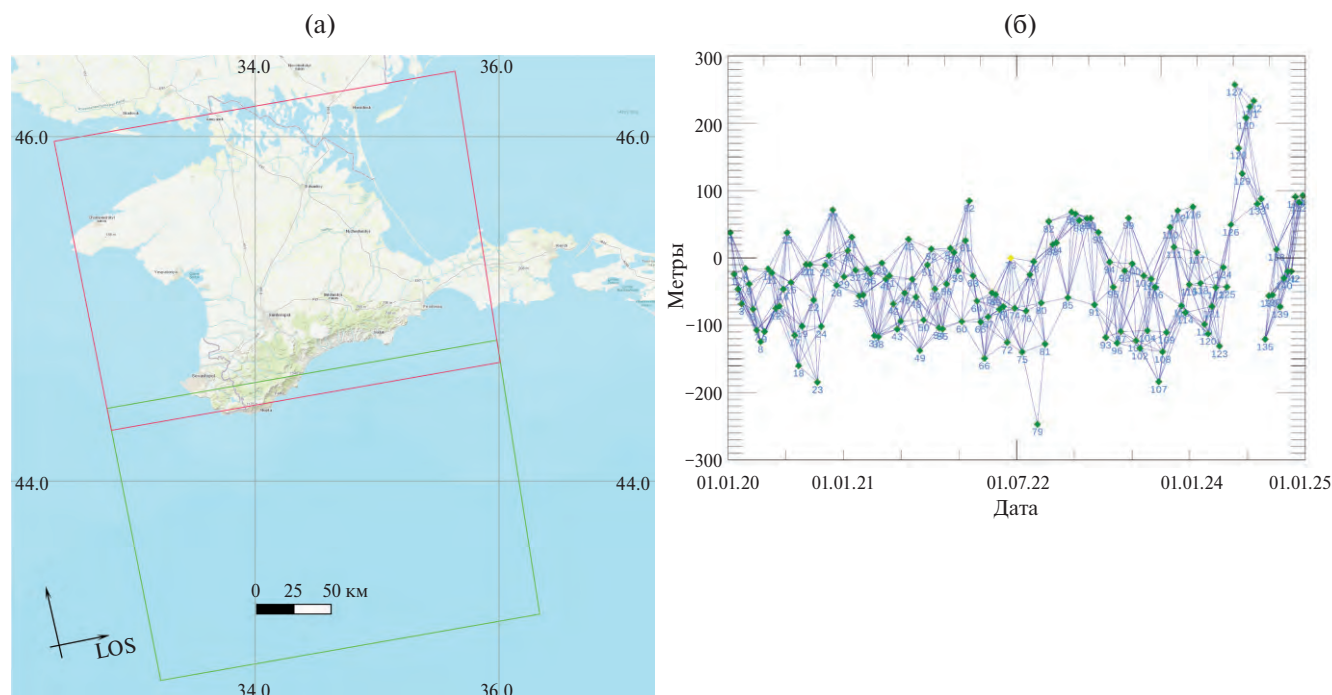


Рис. 1. Данные о радиолокационных изображениях, отобранных для определения смещений земной поверхности методом SBAS: (а) — обзорная карта полуострова Крым и границы использованных снимков (красный и зеленый контур) спутника Sentinel-1A (восходящая орбита № 14); (б) — диаграмма зависимости пространственной и временной базовых линий для сформированных интерферометрических пар. Вертикальная ось — расстояние между положениями спутника во время первой и второй съемки, горизонтальная ось — даты выполнения снимков.

аномальной зоны деформаций поверхности, удовлетворяющие условию:

$$|V_{res} - m| \geq 3\sigma_v^{\max}, \quad (3)$$

здесь m — среднее значение распределения величины V_{res} , $\sigma_v^{\max}$ — максимальное значение точности средней скорости смещений. Для оползневых и других склоновых процессов обычно характерны смещения в одном направлении, в то время как годовая гармоника (период) отражает сезонные эффекты, включая влияние атмосферных и гидрологических процессов [Wasowski, Bovenga, 2014; Cruden, Varnes, 1996]. Поэтому на следующем этапе отбираются только те из кандидатов, для которых линейная составляющая тренда преобладает над периодической (сезонной) компонентой (см. формулу (1)). Положим, что накопленное линейное смещение за период наблюдений должно составлять не менее 75% от величины размаха сезонной гармоник. Тогда для пикселя-кандидата должно выполняться условие:

$$V_{LOS}T \geq 0.75 \cdot 2A_1, \quad (4)$$

где T — длительность интервала наблюдений (годы).

Аномальные области формируются из пикселей, скорости смещений которых удовлетворяют условиям (3) и (4). Пиксель включается в связную область, если расстояние от него до ближайшего пикселя этой области не превышает 75 метров.

Таким образом, были выделены пространственные области с аномальными скоростями смещения земной поверхности, требующие более подробного изучения. На заключительном этапе из этого набора устранялись зоны, в которых медианный угол наклона рельефа не превышал 5° или площадь такой зоны оказывалась меньше 0.10 км^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ и интерпретация поля средних скоростей смещений в региональном масштабе

На рис. 2 показано поле средних скоростей смещений в направлении LOS, рассчитанное по спутниковым данным за интервал времени 2020–2024 гг. Получено, что 99% (критерий 3σ)

значений средней скорости смещений поверхности меняется в диапазоне от -23 до $+23 \text{ мм/год}$, при среднеквадратическом отклонении $\sigma = 7.8 \text{ мм/год}$.

В региональном масштабе в поле средних скоростей смещений прослеживается блоковая структура, частично согласующаяся с положением активных тектонических разломов [Бачманов и др., 2017]. Наиболее четко выделяется обширная область преимущественно отрицательных смещений (в сторону от спутника) в северной части п-ова, которая совпадает с Сивашской впадиной (обозначена индексом I на рис. 2), и область положительных смещений (к спутнику) на территории Керченского п-ова, которая ограничена разломами восточной границы Крымского п-ова (II на рис. 2). Среднее значение скорости смещений в области (I) составляет примерно -8.8 мм/год в направлении LOS, области (II) — $+5 \text{ мм/год}$ (оценки совпадают с медианными значениями). Полученные оценки согласуются с тектоническими данными об опускании Сивашского

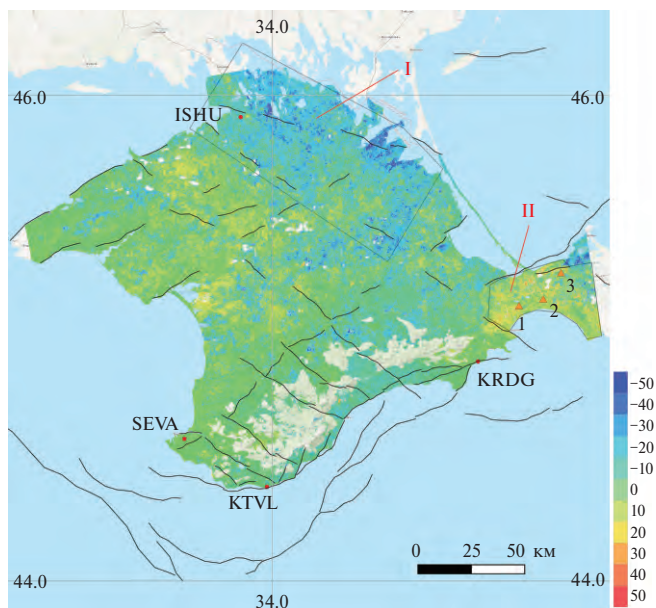


Рис. 2. Карта средних скоростей смещений в направлении на спутник V_{LOS} (мм/год). Отсутствие цветов палитры на карте — области декорреляции. I — район Сивашской впадины, II — район Керченской возвышенности. Черные линии — активные тектонические разломы по работе [Бачманов и др., 2017]. Точками с буквенными индексами обозначены станции ГНСС. Треугольники — действующие грязевые вулканы: 1 — Харциз-Шибан, 2 — Арма-Элинский, 3 — Насырский.

прогиба и подъема Керченской возвышенности соответственно [Юдин, 2011].

Максимальные скорости смещений в сторону от спутника (погружения) наблюдаются вдоль северной, северо-восточной границы Крыма (область I) и местами превышают 50 мм/год. Следует учесть, что этот район представлен низменным, полузатопленным ландшафтом с часто меняющейся неустойчивой отражательной способностью элементов поверхности и низкой когерентностью. Максимальные скорости смещений в сторону к спутнику зафиксированы в области II и также местами превышают 50 мм/год. Природные условия ландшафта в этом районе представляют собой относительно равнинные или холмистые степи в сочетании с сельскохозяйственными угодьями. Здесь рельеф переходит в Керченскую возвышенность, и проходит граница крупнейшей в России Керченско-Таманской провинции грязевых вулканов [Шнюков и др., 2005; Лаврушин, 2012]. В район исследования попадает так называемый Владиславовский грязевулканический очаг (вулкан Харциз-Шибан, Арма-Элинский) и Насырский грязевой вулкан (см. рис. 2). Это действующие вулканы, активность которых в настоящее время сопровождается слабой дегазацией [Лаврушин и др., 2021; 2022; Тверитинова и др., 2020]. Рельеф в области грязевых вулканов плоский. Здесь чередуются небольшие водоемы и пологие сопки. Под поверхностью располагается сложная флюидодинамическая система, включающая систему грязевулканических каналов [Собисевич, 2014; Ершов и др., 2015; Дударов и др., 2022]. Логично предположить, что поля положительных смещений земной поверхности, полученные в этом районе методами РСА-интерферометрии, связаны с ростом давления и развитием диапиров в глинистых толщах. Кроме того, этот район располагается в надвиговой зоне, что также может вносить вклад в подъем земной поверхности.

Горная часть Крыма имеет значительные области декорреляции из-за густой залесенности территории (серый цвет на рис. 2), в то время как на южном и юго-восточном побережье получены в основном небольшие отрицательные скорости смещений.

Сервис Nevada Geodetic Laboratory¹ (NGL) предоставляет в открытом доступе данные

станций глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), с которыми мы можем сопоставить временные ряды, рассчитанные методами РСА-интерферометрии. Выбор станций обусловлен временным интервалом измерений, пересекающимся с временным интервалом полученных спутниковых снимков Sentinel-1A (2020–2024 гг.). Из доступных записей временных рядов ГНСС самые продолжительные и стабильные измерения выполнены на единственном пункте, расположенном на южном берегу Крыма, в пос. Кацивели (станция KTVL на рис. 2), с 2010 г. по настоящее время. Измерения на остальных станциях существенно ограничены во времени и сильно зашумлены, поэтому сопоставление выполнено только с данными станции KTVL. Временные ряды на пункте KTVL выбраны в системе Европейской сети EU (Eurasia Plate Fixed), которые отличаются от сети международной службы IGS (International GNSS Service) только горизонтальными трендами: из восточной и северной компонент вычитается скорость вращения плиты в точке станции, тогда как вертикальная компонента совпадает с IGS [Blewitt et al., 2018]. Тем самым устраняется крупномасштабный горизонтальный тренд движения Евразийской плиты как целого.

Для корректного сопоставления временных рядов суточные компоненты смещений на пункте KTVL пересчитаны в радарные координаты LOS спутника Sentinel-1A с учетом информации о геометрии радарной съемки [Hanssen, 2001]:

$$U_{\text{LOS}}^{\text{GNSS}} = \cos\theta U_z + \sin\theta(U_N \sin\alpha - U_E \cos\alpha), \quad (5)$$

где: U_E , U_N , U_z — величины смещений пункта ГНСС в направлениях восток, север и по вертикали соответственно; α — азимут орбиты спутника; θ — угол распространения электромагнитного сигнала радара спутника; $U_{\text{LOS}}^{\text{GNSS}}$ — смещения в направлении на спутник, рассчитанные по данным ГНСС. Карты углов обзора и азимута орбиты спутника предоставляются ЕКА вместе со снимками.

Графики временных рядов, рассчитанных методом SBAS, и данных станции KTVL содержат существенную сезонную составляющую (рис. 3а). С высоким уровнем шумов во временном ряде станции KTVL связан низкий коэффициент корреляции двух рядов, равный

¹ <https://geodesy.unr.edu/>, [Blewitt et al., 2018].

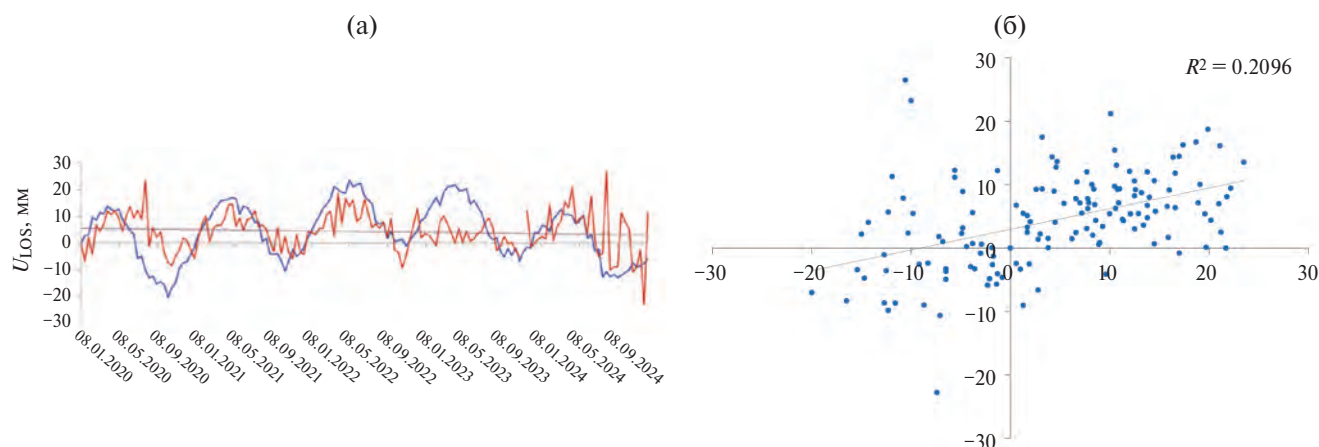


Рис. 3. Сопоставление временных рядов накопленных смещений и данных ГНСС (в мм): (а) — временные ряды, рассчитанные методом SBAS (синий график), и полученный по данным станции KTVL (красный график). Линии тренда для ряда SBAS (синяя) и для ряда KTVL (красная) полностью совпадают; (б) — корреляционная зависимость временных рядов SBAS (горизонтальная ось) и ГНСС (KTVL) (вертикальная ось), R^2 - коэффициент детерминации.

0.46 (рис. 3б), и средняя абсолютная невязка, которая составляет 7.8 мм. Тем не менее, линии регрессии, построенные по данным ряда SBAS и по данным станции KTVL, имеют близкий угловой коэффициент -0.48 и -0.53 мм/год соответственно, т.е. невязка средних скоростей смещений на большом временном интервале (с 2020 по 2024 г.) не превышает 0.05 мм/год. Следовательно, в пределах субмиллиметровой точности измерений, значение средней скорости смещений на станции KTVL и рассчитанное методом SBAS, совпадают.

В отношении геодинамики по имеющимся данным на станции CRAO [Nevada Geodetic Laboratory], расположенной в 2.84 км северо-восточнее от KTVL, записи измерений вертикальной компоненты за период наблюдений с 2000 по 2020 г., выбранные также в системе Европейской сети EU (Eurasia Plate Fixed), свидетельствуют о незначительном погружении поверхности со скоростью -0.25 мм/год.

Анализ и интерпретация поля средних скоростей смещений в локальном масштабе

Интенсивные экзогенные геологические процессы, которые во множестве происходят по всей территории Крыма, приводят к появлению большого количества локальных зон деформаций.

Визуально обнаружить по карте средних скоростей смещений все локальные опасные участки на территории площадью 27 тыс. км²

чрезвычайно трудно. Для этих целей был разработан рассмотренный выше алгоритм поиска аномальных областей смещений земной поверхности, результатом работы которого является набор объектов в виде полигональных контуров выявленных смещений. Количество полученных объектов зависит от настроек чувствительности алгоритма. В частности, в данном исследовании задано ограничение на минимальный размер площади деформаций не менее 0.1 км². В результате в горных районах и Югобережье был выделен 61 полигон (рис. 4), смещения в пределах которых после детального анализа и интерпретации могут потребовать проведения дальнейшего наземного и спутникового мониторинга.

Среди выделенных объектов многие участки приурочены к сельскохозяйственным полям, виноградникам, располагающимся, в том числе на склонах холмистой и горной местности. Это, например, области под номерами 6, 14, 25, 30 и др. (рис. 5а, 5б, 5в, — верхний ряд). Максимальные скорости смещений в областях, отмеченных на картах 5а, 5б, 5в составляют -20 — -24 мм/год. На оседание или смещение поверхности вниз по склону на такой местности естественным образом влияют интенсивное орошение, эрозия почвенного слоя, обработка земельных участков техникой и т.д., что при дополнительном воздействии грунтовых вод может в дальнейшем провоцировать зарождение и развитие оползневых процессов.

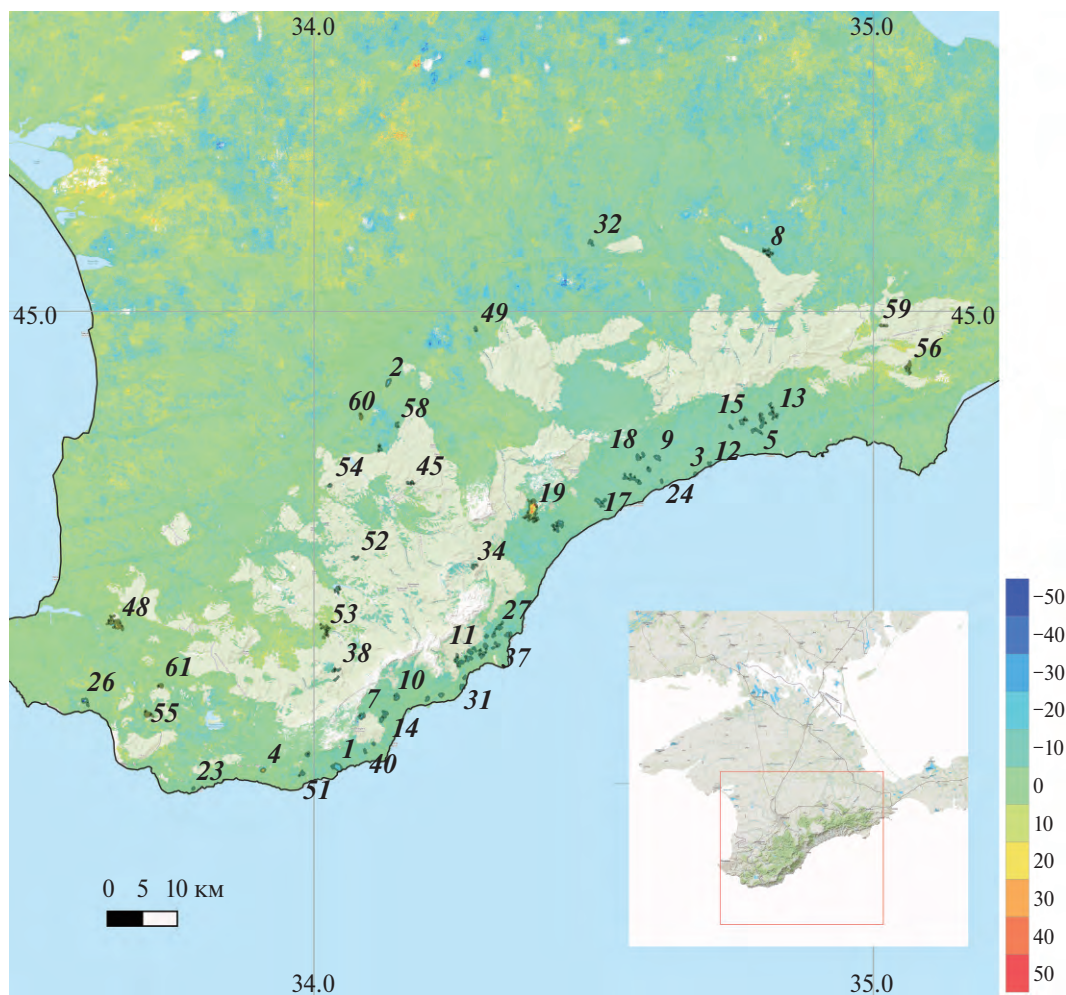


Рис. 4. Поле средних скоростей смещений (мм/год). Цифрами обозначены выявленные области аномальных смещений.

Также выделяются районы, связанные с техногенными процессами. Например, на рис. 6а в верхней и нижней части карты видны два заброшенных карьера Балаклавского рудоуправления, в окрестности которых заметны активные смещения земной поверхности. Эти участки выделяются синим цветом, соответствующим отрицательным значениям смещений. Важно отметить, что область смещения в районе точки А, интерпретируемая нами как разрушение западного борта карьера, находится рядом с действующей смотровой площадкой. Скорость смещений здесь достигает порядка -20 мм/год и за пятилетний период (с 2020 по 2024 г.) накопленные смещения составили около 100 мм. По графику временного ряда видно, что процесс разрушения идет равномерно и постоянно (см. желтый график накопленных смещений на рис. 6а). Деятельность по подготовке к разработке нового

карьера зафиксирована в области № 26 в правой части рисунка. Максимальные смещения вдоль линии LOS на этом участке составляют -60 мм/год. Послойная выработка породы должна в основном сопровождаться смещениями поверхности по вертикали. Поэтому, полагая в формуле (5) горизонтальные компоненты смещений равными нулю, получим вертикальную компоненту смещений $U_z = U_{\text{LOS}}/\cos(\theta) = -72.9$ мм/год. Проинтегрировав по объему внутреннюю область полигона № 26, получим, что суммарная выемка породы составила $3483.92 \text{ м}^3/\text{год}$.

Следующий объект с интенсивными изменениями — это полигон № 28 (рис. 6б), “Гаспринская свалка” (территория бывшего полигона твердых бытовых отходов). Поскольку организована эта гигантская мусорная свалка на склоне с крутизной по медиане около 17° , а максимальная величина уклона составляет почти 38° , то существенный

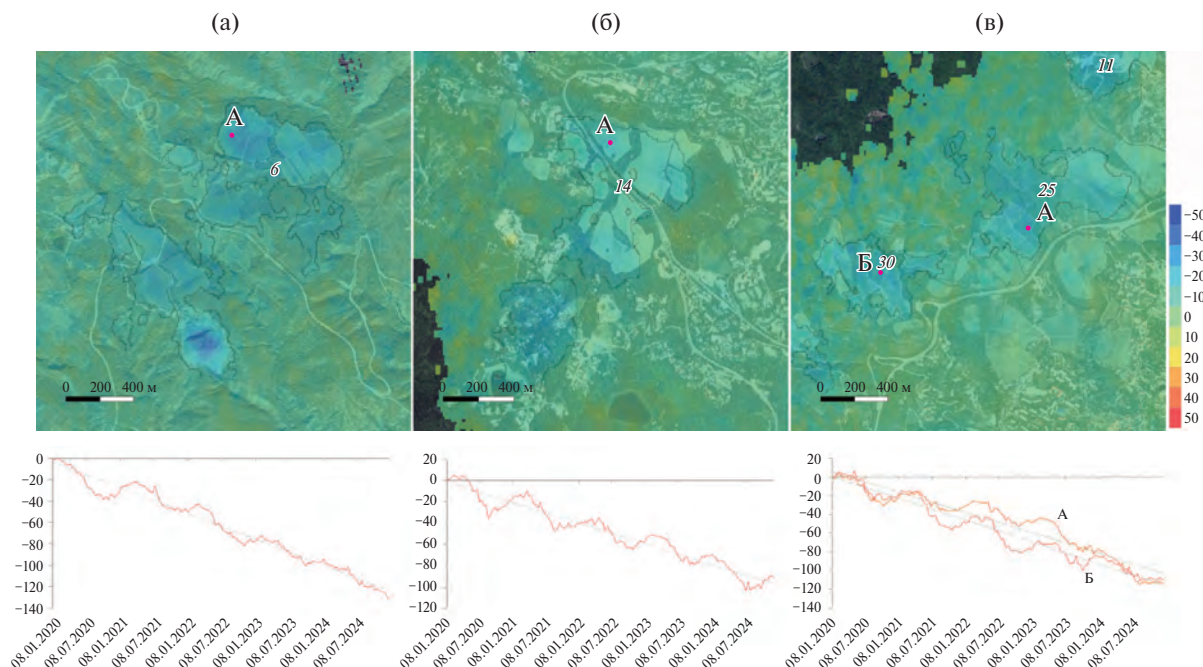


Рис. 5. Карты средних скоростей смещений поверхности (V_{LOS} , мм/год) (верхний ряд) и графики временных рядов накопленных смещений (U_{LOS} , мм) в точках, обозначенных на картах буквами А и Б (нижний ряд). В верхнем ряду области смещений ограничены полигонами: (а) — № 6; (б) — № 14; (в) — № 25, № 30.

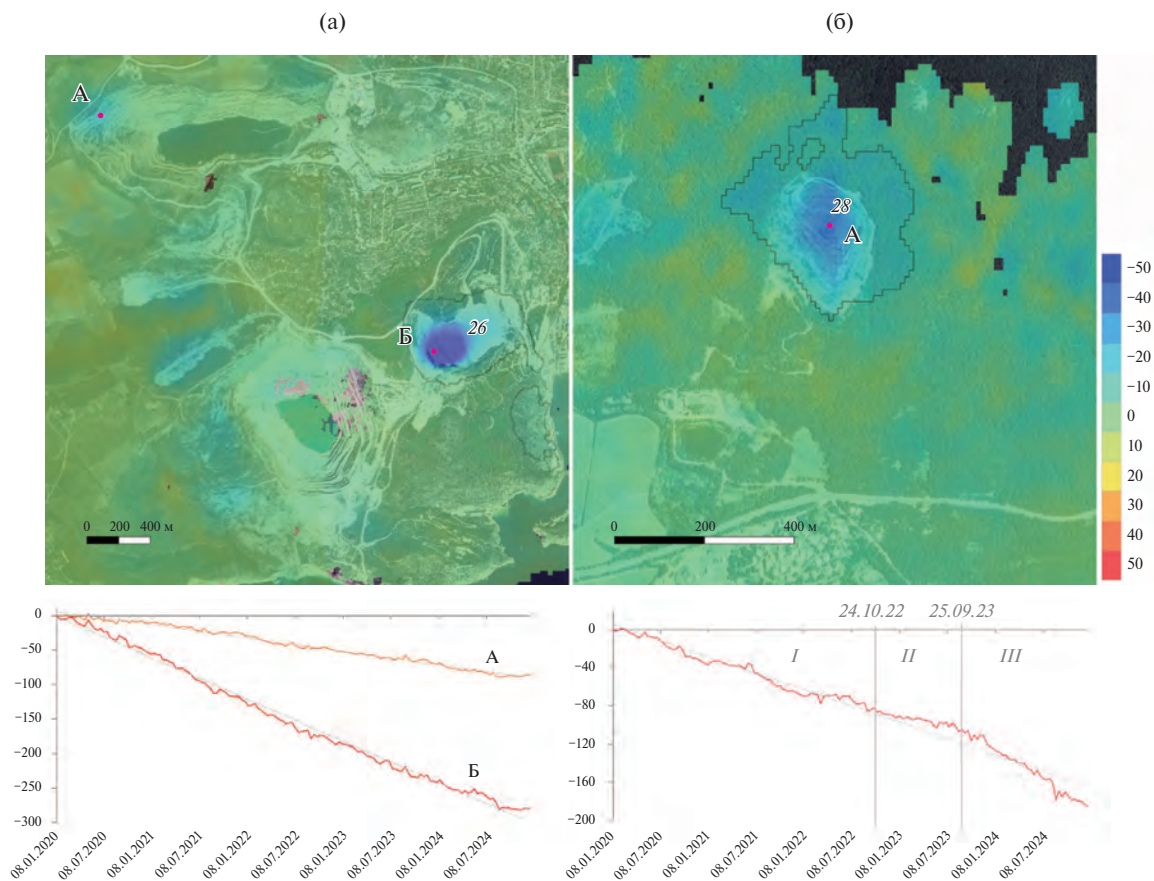


Рис. 6. Карта средних скоростей смещений поверхности (V_{LOS} , мм/год) (верхний ряд) и графики временных рядов (U_{LOS} , мм) в областях, обозначенных на картах красными точками А и Б (нижний ряд): (а) — район карьеров; (б) — "Гаспринская свалка" (полигон № 28).

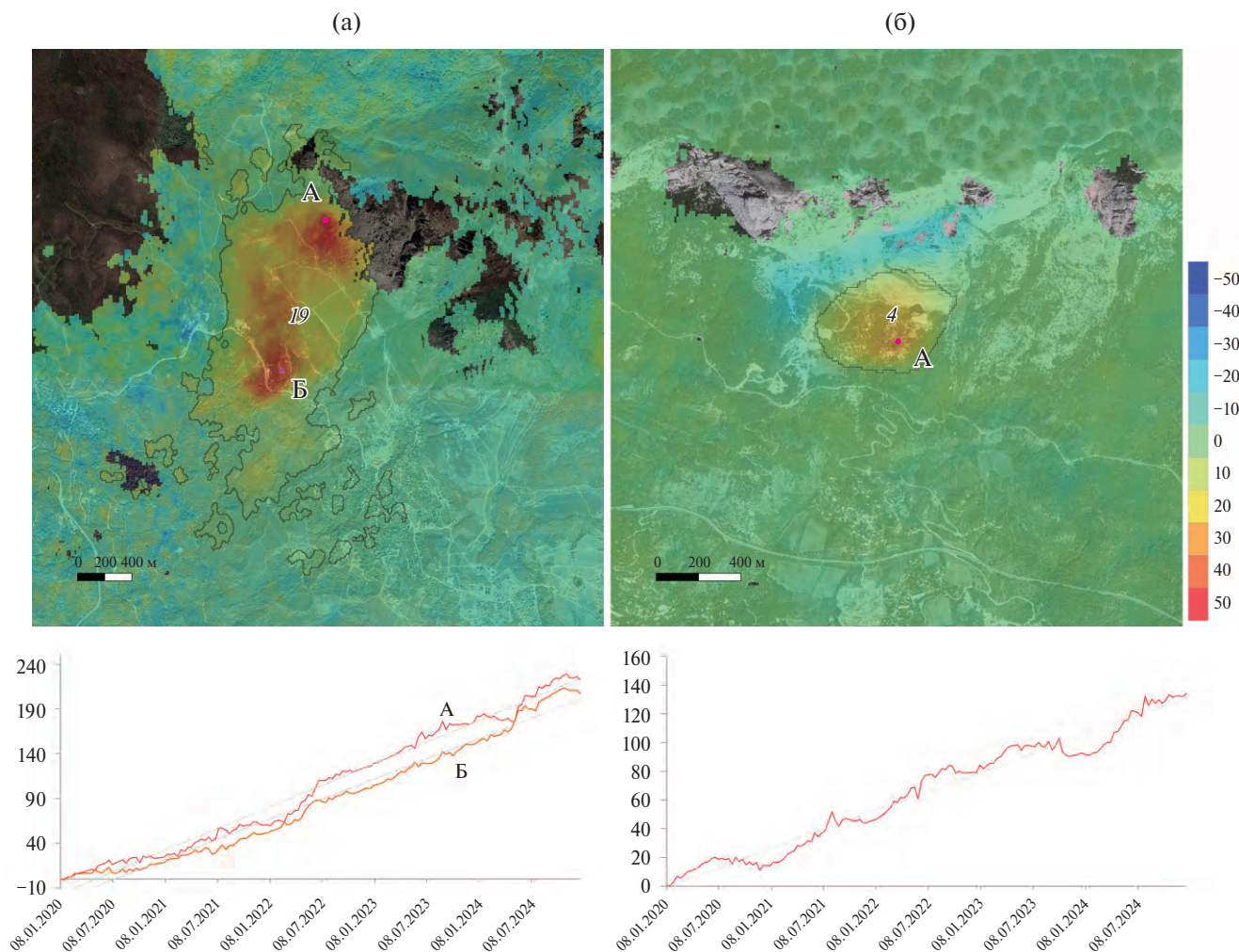


Рис. 7. Средние скорости смещений поверхности (V_{LoS} , мм/год) (верхний ряд) и графики временных рядов накопленных смещений (U_{LoS} , мм) в точках, обозначенных буквами А и Б на картах (нижний ряд): (а) — район горного массива Демерджи, оползень-обвал северо-западнее с. Лучистое (полигон № 19); (б) — район пос. Парковое (полигон № 4): синий цвет указывает на постепенное обрушение края Ай-Петринской яйлы, красный — на оползневые смещения вниз по склону.

вклад в вектор скорости смещения поверхности в этой области, очевидно, вносят горизонтальные компоненты. Максимальная скорость смещения от спутника равна -34 мм/год. Скорее всего, объект “Гаспринская свалка” не только уплотняется под действием силы тяжести накопленного мусора и оседает, но и сползает вниз по склону в сторону курортного поселка Гаспра, до границы которого остается не более 400 метров. Временной ряд накопленных смещений на нижнем рис. 6б, характеризующий перемещения объекта “Гаспринская свалка”, можно разделить на три интервала по характеру движения. На интервале I с января 2020 г. по октябрь 2022 г. накопленные смещения составили -86 мм, т.е. средняя скорость смещений равна примерно -30.8 мм/год. К

концу интервала II (сентябрь 2023 г.) накопленные смещения достигли -106 мм, соответственно средняя скорость смещений на этом интервале уменьшилась до -21.8 мм/год. К концу интервала III (декабрь 2024 г.) накопленные смещения достигли величины -186 мм, и скорость смещений на этом интервале возросла до -64 мм/год. Следовательно, за последние годы гигантская мусорная пирамида ускорила свое движение по сравнению с первым периодом почти в два, а со вторым — почти в три раза.

Особое внимание следует уделять оползням и обвалам, расположенным в окрестности населенных пунктов и объектов инфраструктуры. Самая большая по площади (2.3 км²) область смещений (полигон № 19) выявлена северо-за-

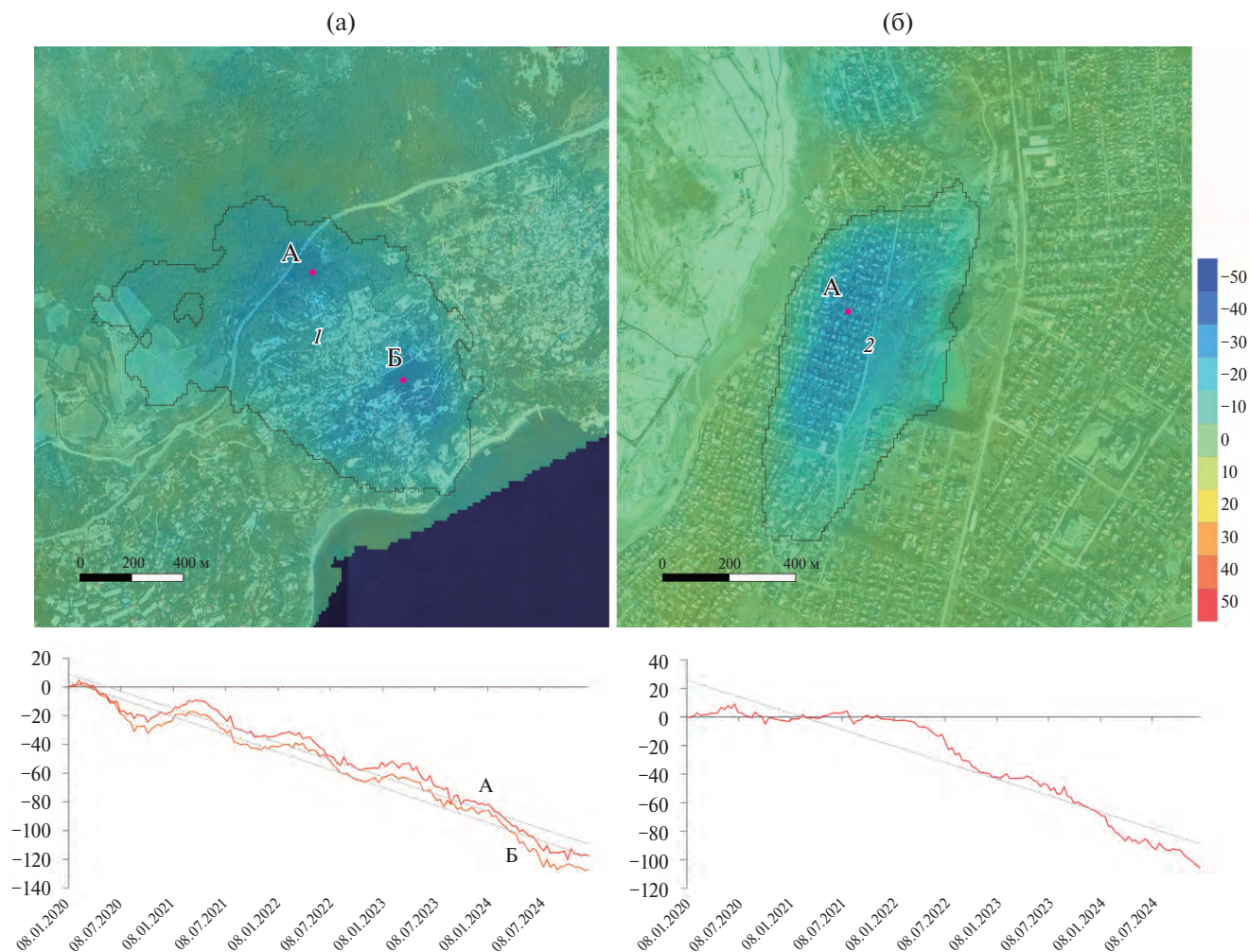


Рис. 8. Средние скорости смещений поверхности (V_{LOS} , мм/год) (верхний ряд) и графики временных рядов накопленных смещений (U_{LOS} , мм) в точках, обозначенных буквами А и Б на картах (нижний ряд); (а) — Большая Алупкинская оползневая система (полигон № 1); (б) — Марьинский оползень слева от карьера по добыче глины, г. Симферополь (полигон № 2).

паднее с. Лучистое, в районе горного массива Демерджи (рис. 7а). В границах полигона выделяется два максимума, в которых средняя скорость смещений достигает +50 мм/год. В верхней части, справа от восточной границы полигона, видна значительная область декорреляции. Это может быть связано с тем, что в этом месте контур полигона проходит у подножия склона с крутизной примерно 30°. Поскольку обвалы и оползни в этом районе происходят регулярно, то, вероятнее всего, декорреляция связана с осыпанием горных пород, которые смещаются вниз по склону и накапливаются на участке с более пологим рельефом. Суммарное смещение в направлении на спутник согласно формуле (5) также включает и горизонтальные смещения склона на юго-запад, т.е. в сторону спутника

(положительные смещения). Временной ряд на рис. 7а показывает, что смещения происходят во времени почти равномерно, что свидетельствует о высокой оползневой опасности для населения и туристических маршрутов.

Аналогичный обвал/оползень выявлен в районе современного пос. Парковое, в 7 км западнее Симеиза (рис. 7б). На рисунке хорошо видны область постепенного обрушения края Ай-Петринской яйлы (отрицательные значения) и скопление обломочного материала у подножия (полигон № 4). Максимальные величины скорости обрушения пород составляют –18–20 мм/год, а максимальные значения в области положительных смещений +26 мм/год. Свой вклад могут вносить и оползневые смещения вниз по склону, который открывается на юг–юго-запад.

Наиболее опасны для населения оползневые и эрозионные процессы, которые развиваются непосредственно в населенных пунктах. На рис. 8 показаны области с деформацией земной поверхности, затрагивающие жилые районы. Выделенный полигон № 1 на рис. 8а является частью Большой Алушкинской Оползневой Системы [Горбатюк и др., 2018]. На временных рядах, построенных в верхней и нижней точках полигона, (красный и желтый графики соответственно), на фоне сезонной компоненты четко выделяются смещения вниз по склону юго-восточной экспозиции. Смещения происходят постоянно, со средней скоростью -24 мм/год. Следует отметить некоторое повышение средней скорости смещений начиная с 2023 г.

Один из наиболее активных оползневых районов Симферополя, Марьинский оползень, расположен рядом с карьером по добыче глины (полигон № 2 на рис. 8б). Максимальная средняя скорость смещений на этом оползне составила -23.5 мм/год (склон имеет юго-восточную экспозицию, поэтому смещения вниз по склону в направлении LOS отрицательные). При этом на графике накопленных смещений (рис. 8б) видно, что длительное время этот район не был активным. Но в декабре 2021 г. начали фиксироваться миллиметровые подвижки, затем склон начал терять устойчивость, и с 10.03.2022 г. до конца периода наблюдений (24.12.2024 г.) смещения развиваются с высокой скоростью, до -41 мм/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Методы спутниковой радарной интерферометрии позволяют оперативно выполнять мониторинг очень больших территорий, при этом решая как фундаментальные, так и практические задачи, связанные с безопасностью населения, экологией и недропользованием.

Региональные компоненты карт средних скоростей смещений позволяют выявлять тектонические и геологические процессы, которые определяют деформации поверхности Крымского полуострова. Эти процессы в целом ряде областей четко проявляются на временных рядах смещений отражающих объектов на фоне помех и сезонных компонент. Так, например, область в северной части Крыма имеет в целом отрицательные смещения всей территории

со средней скоростью примерно -8.8 мм/год в направлении вектора LOS. Здесь происходит опускание Сивашской впадины, которое проявляется в поле смещений, полученных методами РСА-интерферометрии. В восточной части Крыма, на территории Керченского полуострова, средняя скорость смещений всего района составляет $+5$ мм/год. Здесь начинается грязе-вулканическая провинция, а также выделяется Керченская надвиговая зона. Вклад в положительные смещения (к спутнику) могут вносить эндогенная флюидодинамика, глиняный диапиризм и вертикальные смещения висячего крыла надвиговой зоны.

Показано хорошее согласование между временными рядами смещений на Югобережье, рассчитанных по данным РСА-интерферометрии и по измерениям на пункте ГНСС в пос. Качивели (станция KTVL). Получены близкие средние скорости смещений по РСА и ГНСС за исследуемый период (2020–2024 гг.), которые составили -0.48 и -0.53 мм/год соответственно. Такие скорости согласуются с геологическими данными о незначительном погружении земной поверхности как на пункте KTVL, так и на пункте CRAO, расположенном в 2.84 км на СВ.

Полученные результаты показывают, что методы РСА-интерферометрии играют важную роль в изучении фундаментальных вопросов геодинамики и тектоники региона.

В локальном масштабе с помощью предложенного в работе алгоритма поиска аномальных областей деформаций земной поверхности по полю средних скоростей смещений были выявлены потенциально опасные объекты, классифицируемые как: а) эрозия почвенного слоя, связанная с аграрной деятельностью; б) разработка карьеров и обрушение их бортов; в) оползни, обвалы. Полученные на выделенных объектах временные ряды смещений позволили обнаружить деформации грунта на сельхозугодьях (рис. 5), почти трехкратное увеличение скорости движения активного оползня в районе “Гаспринской свалки”, а также зафиксировать начало процесса активизации Марьинского оползня. Смещения этого оползня были невелики до середины марта 2022 г., после чего наблюдается резкое ускорение его движения до 41 мм/год.

Высокая чувствительность методов РСА-интерферометрии к смещениям земной поверхности и возможность выполнять мониторинг одновременно большого количества объектов на обширной территории позволяют заранее предупреждать о развитии потенциально опасных процессов, принимать меры по предотвращению или минимизации развития природных и техногенных катастроф.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Европейское космическое агентство за предоставленные снимки спутника Sentinel-1A.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агаркова-Лях И.В., Лях А.М. Условия развития и активность экзогенных геологических процессов на берегах Юго-Западного Крыма от мыса Айя до мыса Сарыч // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2020. Т. 20. Вып. 2. С. 76–85. DOI: 10.18500/1819-7663-2020-20-2-76-85
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8 (4). С. 711–736. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
- Волкова М.С., Михайлов В.О., Османов Р.С. Анализ эффективности применения глобальной погодной модели HRES (GACOS) для коррекции атмосферных помех в интерферометрических оценках полей смещений на примере вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 9–22. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22
- Горбатюк Н.В., Ерыш И.Ф., Лизогуб Е.В. Особенности формирования Большой Алушкинской Оползневой Системы (БАОС) для обоснования комплекса инженерной защиты территории // Экономика строительства и природопользования. 2018. № 4 (69). С. 62–70.
- Дударов З.И., Собисевич А.Л., Белобородов Д.Е. Флюидопроводящие структуры грязевого вулкана Джау-Тепе по результатам геолого-геофизических исследований // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 2. С. 142–147. DOI: 10.31857/S2686739722040041
- Ершов В.В., Собисевич А.Л., Пузич И.Н. Глубинное строение грязевых вулканов Тамани по данным натурных исследований и математического моделирования // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 2. С. 69–76.
- Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В. О времени и механизме воздымания большого Кавказа, генетическом типе и истории заполнения предкавказских прогибов — традиционные и современные представления // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16 (3). С. 0825. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-3-0825>. EDN: wmqwmi
- Лаврушин В.Ю., Айдаркожина А., Сокол Э.В., Челноков Г.А., Петров О.Л. Грязевулканические флюиды Керченско-Таманской области: геохимические реконструкции и региональные тренды. Сообщение 1. Геохимические особенности и генезис грязевулканических вод // Литология и полезные ископаемые. 2021. № 6. С. 485–512.
- Лаврушин В.Ю., Айдаркожина А., Сокол Э.В., Челноков Г.А., Петров О.Л. Грязевулканические флюиды Керченско-Таманской области: геохимические реконструкции и региональные тренды. Сообщение 2: генезис грязевулканических газов и региональные геохимические тренды // Литология и полезные ископаемые. 2022. № 1. № 1. С. 3–27.
- Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. Тр. ГИН РАН вып. 599 / Б.Г. Поляк (отв. ред.). М.: ГЕОС. 2012. 348 с.
- Отчет о результатах работ за 2023 год по мероприятию: “Государственный мониторинг состояния недр территории республики Крым”. г. Симферополь. 2023.
- Сим Л.А., Гордеев Н.А., Сычева Н.А. Неотектонические и современные напряжения Степного Крыма // Геосистемы переходных зон. 2025. Т. 9. № 4. С. 345–360. DOI: 10.30730/gtrz.2025.9.4.345-360
- Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Тверитинова Т.Ю. О грязевом вулканизме в позднеальпийском складчатом сооружении Северо-Западного Кавказа (на примере изучения глубинного строения грязевого вулкана Шуго) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. № 2 (36). С. 80–93.
- Тверитинова Т.Ю., Белобородов Д.Е., Лиходеев Д.В. Грязевые вулканы в структуре Керченского полуострова // Электронный научно-образовательный журнал “Динамическая геология”. 2020. № 1. С. 38–54.
- Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А., Кутный В.А., Гусаков И.Н., Трофимов В.В. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар: ГлавМедиа. 2005. 176 с.
- Юдин В.В. Геологическое строение Крыма на основе актуалистической геодинамики. Вопросы развития Крыма: приложение к науч.-практ. дискуссионно-аналитическому сб. Симферополь. Комитет по науке и региональному развитию при Совмине АРК, Крымская АН. 2001. 46 с.
- Юдин В.В., Геодинамика Крыма. Монография. Симферополь: ДИАЙПИ. 2011. 336 с. ISBN: 978-966-491-173-0
- Юдин В.В., Юровский Ю.Г. Неогеодинамика Крымско-Черноморского региона. Строительство и техногенная безопасность. Сборник науч. трудов Междунар. конф. Геодинамика, сейсмическая опасность, сейсмостойкость сооружений (Алушта, 15–22 мая 2011 г.). Симферополь, НАПКС. 2011. С. 50–56.

- Blewitt G., Hammond W., Kreemer C.* Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science // *Eos*. 2018. V. 99. DOI: 10.1029/2018EO104623
- Burgmann R., Rosen P.A., Fielding E.J.* Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2000. V. 28. P. 169–209. DOI: 10.1146/annurev.earth.28.1.169
- Casu F., Manzo M., Lanari R.* A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data // *Remote Sensing of Environment*. 2006. V. 102. № 3–4. P. 195–210. DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.023
- Cruden D.M., Varnes D.J.* Landslide types and processes. *Landslides: Investigation and Mitigation* / A.K. Turner, R.L. Schuster (eds.). Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council. 1996. (Special Report 247). P. 36–75.
- Ferretti A.* Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space. Houten: EAGE Publications. 2014. 160 p. DOI: 10.3997/9789073834712. ISBN 978-90-73834-71-2
- Ferretti A., Savio G., Barzaghi R., Borghi A., Musazzi S., Novali F., Prati C., Rocca F.* Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. V. 45. № 5. P. 1142–1153. DOI: 10.1109/TGRS.2007.894440
- Hanssen R.F.* Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2001. 308 p. DOI: 10.1007/0-306-47633-9
- Hooper A., Bekaert D., Spaans K., Arikian M.* Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation // *Tectonophysics*. 2012. V. 514–517. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.10.013
- Massonnet D., Feigl K.L.* Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface // *Reviews of Geophysics*. 1998. V. 36. № 4. P. 441–500. DOI: 10.1029/97RG03139
- Patina I.S., Leonov Yu.G., Volozh Yu.A., Kopp M.L., Antipov M.P.* Crimea–Kopet Dagh Zone of Concentrated Orogenic Deformations as a Transregional Late Collisional Right-Lateral Strike-Slip Fault // *Geotectonics*. 2017. V. 51. P. 353–365. DOI: 10.1134/S0016852117040069
- Rodriguez E., Martin J.M.* Theory and design of interferometric synthetic aperture radars // *IEE Proceedings F — Radar and Signal Processing*. 1992. V. 139. № 2. P. 147–159. <https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1992.0018>
- Smolyaninova E.I., Mikhailov V.O., Lyakhovsky V.A.* Numerical modelling of regional neotectonic movements in the northern Black Sea // *Tectonophysics*. 1996. V. 266. № 1–4. P. 221–231.
- Wasowski J., Bovenga F.* Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: current issues and future perspectives // *Engineering Geology*. 2014. V. 174. P. 103–138. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.003
- Yu C., Li Z., Penna N.T., Crippa P.* Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. V. 123. № 10. P. 9202–9222. DOI: 10.1029/2017JB015305

Identification and Analysis of Multiscale Displacement Fields by SAR Interferometry Using the Example of the Crimean Peninsula

R. S. Osmanov^{a, *}, M. S. Volkova^a, and V. O. Mikhailov^a

^aSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: osmanovrustam135@gmail.com*

Received February 25, 2026; revised March 17, 2026; accepted March 19, 2026

This paper presents the results of displacement monitoring over the extensive territory of the Crimean Peninsula for the period from 2020 to 2024, based on satellite images equipped with synthetic aperture radar (SAR). The displacement fields were analyzed and interpreted at both regional and local scales. It was found that 99% (3σ) of the average surface displacement rates vary within the range from -23 to $+23$ mm/yr. The regional component of the average displacement-rate field exhibits a block structure consistent with the location of several active tectonic faults. The dynamics of the regional negative and positive displacements obtained from SAR interferometry data are consistent with the well-known tectonic trend of subsidence of the Sivash Depression and uplift of the Kerch Upland.

The causes of local processes of natural or anthropogenic origin identified in certain areas are discussed. At the local scale, using the algorithm proposed in this paper for detecting anomalous deformation areas, 61 polygons ranging in area from 0.1 to 2.3 km² were identified, among which areas affected by landslide processes are of particular importance. The dynamics of the movement of individual landslide masses were investigated.

The obtained results demonstrate the high efficiency of radar interferometry for solving a wide range of both fundamental and applied problems, including those related to environmental issues and public safety.

Keywords: SAR interferometry, Sentinel-1, SBAS, GNSS, displacement time series, monitoring, Crimea, landslides