

УДК 550.814

ЭФФЕКТ НАВЕДЁННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ МАРОККО, ВЫЗВАННЫЙ УМЕНЬШЕНИЕМ ОБЪЁМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ГРАВИМЕТРИИ

© 2024 г. Академик РАН В. Г. Бондур^{1,*}, Т. Н. Чимитдоржиев², А. В. Дмитриев²

Поступило 20.02.2024 г.

После доработки 13.03.2024 г.

Принято к публикации 18.03.2024 г.

По данным спутниковой радиолокационной интерферометрии Sentinel-1 методом взвешенного усреднения интерферограмм (Stacking-InSAR) для 801 интерферограммы исследована геодинамика в районе эпицентра разрушительного землетрясения с магнитудой $M_w = 6.8$, происходившего на территории Марокко 8 сентября 2023 г. За период времени с января 2019 по сентябрь 2023 г. обнаружены локальные опускания, средняя скорость которых составляла 1.5 см/год, а максимальная скорость была выявлена в 2023 г. и составляла 24 см/год, для площадей с развитой мелиоративной системой, расположенной над водоносными горизонтами. На основании совместного анализа изменений толщины эффективного слоя воды, измеренной по спутниковым гравиметрическим данным за 2000–2023 гг., и количества осадков установлено, что опускание поверхности происходило из-за изъятия огромных объёмов воды из подземных горизонтов. В предположении сходства форм изосейст землетрясений с близкими эпицентрами выполнено сравнение изосейст землетрясений, происходивших в 2014 и 2023 гг., позволившее выявить расширение контуров изосейст в сторону опускающихся фрагментов поверхности для землетрясения 2023 г. Предположено, что этот процесс совместно с тектоническими движениями евразийской и нубийской плит увеличивал напряжённо-деформированное состояние между двумя водоносными горизонтами, в результате чего 8 сентября 2023 г. на территории Марокко произошло землетрясение с $M_w = 6.8$.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, спутниковая гравиметрия, метод взвешенного усреднения интерферограмм, сейсмичность, изосейсты, опускание поверхности, водоносные горизонты

DOI: 10.31857/S2686739724070205

ВВЕДЕНИЕ

Сильное разрушительное землетрясение с магнитудой $M_w = 6.8$ произошло 8 сентября 2023 года на территории Марокко в 21:11 по местному времени [1]. Его очаг залегал на глубине 19 км километров. Эпицентр этого землетрясения с координатами 31.0643° с. ш., 8.3907° з. д. находился в 72 км к юго-западу от города Марракеша. Позже в этом же районе были зарегистрированы два землетрясения меньшей мощности: 8 сентября 2023 г. с магнитудой $M_w = 4.9$ и 10 сентября 2023 г. с магнитудой $M_w = 4.2$.

По предварительным данным число погибших составило более 2940 человек, а число пострадавших около 5530 человек. Землетрясение, произошедшее 8 сентября 2023 г., являлось самым сильным в этом районе за последние 120 лет (в радиусе 500 км от эпицентра, начиная с 1900 г. не было зарегистрировано ни одного землетрясения с $M_w > 6$).

В работе [1] для анализа косейсмических сдвигов, связанных с этим землетрясением, использовались данные радиолокационной интерферометрии. В целом, подобный подход по оценке косейсмических сдвигов широко используется исследователями, так как позволяет оценить различные характеристики произошедших землетрясений. Например, в работе [2] получены поля смещений земной поверхности и построена модель поверхности сейсмического

¹ Научно-исследовательский институт Аэрокосмос, Москва, Россия

² Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской Академии наук, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

разрыва в районе Турецкого землетрясения, происшедшего в феврале 2023 г., а в работе [3] хорошее согласие результатов спутниковой интерферометрии и сейсмологических полевых наблюдений позволило рассматривать область максимальных смещений в качестве проекции верхней части очаговой зоны на земную поверхность для района Хубсугульского землетрясения, состоявшегося в 2021 г.

Наряду с оценками косейсмических деформаций интерес представляет также анализ временных рядов данных радиолокационной интерферометрии в периоды времени между сейсмическими событиями. Эффективность оценки напряжённо-деформированного состояния земной коры в периоды, предшествующие землетрясениям, продемонстрирована в работах [4, 5]. Так, в работе [5] с использованием современных облачных технологий были обработаны большие объёмы радиолокационных интерферометрических данных, полученных за период времени 2019–2022 гг., что позволило выявить аномальную геодинамику в период, предшествующий катастрофическому землетрясению с магнитудой $M_w = 7.8$, состоявшемуся 6 февраля 2023 г. на территории Турции. В работе [5] был использован метод взвешенного усреднения интерферограмм (англ. — *Stacking-InSAR*). Основным преимуществом этого метода, в отличие от методов постоянных рассеивателей (*PS InSAR*) и малых базовых линий (*SBAS InSAR*), является возможность получения непрерывного поля скоростей смещений практически всех пикселей изображения вдоль направления на спутник. А результаты применения этого метода сопоставимы с результатами, полученными методом *SBAS* [6]. Воспользуемся этим методом оценки временных рядов данных радиолокационной интерферометрии по району землетрясения в Марокко.

Известно, что сейсмическая активность на территории Марокко связана с конвергенцией Евразийской и Нубийской (Африканской) плит со скоростью порядка 4–5 мм/год [1, 7]. При этом граница между плитами протяжённая, а напряжённо-деформированное состояние вдоль этой границы и на её периферии различно. Поэтому интерес представляет ответ на вопрос: что явилось триггером сейсмоактивности именно в данном районе Атласских гор? Для ответа на этот вопрос помимо метода взвешенного усреднения интерферограмм в настоящей работе мы воспользуемся данными спутниковой гравиметрии *GRACE* [8] и различными геоинформационными онлайн ресурсами.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДАННЫХ

По аналогии с Турецким землетрясением в феврале 2023 г. [5] рассмотрим долговременные сдвиги геоблоков и различные аномальные деформации перед землетрясением, происшедшим 8 сентября 2023 года на территории Марокко. Для этого использовались данные радиолокатора *Sentinel-1* (длина волны $\lambda = 5.6$ см) на восходящей орбите. В отличие от нисходящей орбиты это позволило: 1) практически исключить оценку надвигов Евразийской и Африканской плит, которые при восходящей орбите перпендикулярны линии радиолокационного обзора; 2) измерить сдвиги, приуроченные к основным разломам в этой области, поскольку при такой геометрии зондирования радиолокационный обзор параллелен (или близок к параллельности) этим разломам. Следует также отметить, что по данным *USGS* надвиговая компонента всё же имеется, но в данном случае проявляется слабо из-за геометрии съёмки. Кроме того, независимо от геометрии радарной съёмки выявлялись участки вертикальных деформаций, проявлявшихся в поднятиях и опусканиях земной поверхности.

Первоначально, для обработки больших объёмов радиолокационных данных, полученных со спутников *Sentinel-1A/B*, был использован современный функционал онлайн платформы *Alaska Satellite Facility's Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3)* [9]. Эта онлайн платформа предоставляет доступ к радиолокационным данным спутников *Sentinel-1A/B* и позволяет выбирать данные для радиолокационной интерферометрии и выполнять интерферометрическую обработку, начиная от совмещения изображений, до получения развернутой фазы с помощью программного обеспечения *GAMMA*.

Временные ряды развернутой фазы с пространственным разрешением 80 м были получены при помощи функционала *HyP3* и далее использовались для расчётов методом *Stacking-InSAR*. Для района землетрясения с магнитудой $M_w = 6.8$, произошедшего 8 сентября 2023 года на территории Марокко, были получены 801 интерферограмма с обоих спутников *Sentinel-1A/B* на восходящей орбите. При расчете годовых смещений общее число интерферограмм составило: 236 за 2019 г., 254 за 2020 г., 242 за 2021 г., 55 за 2022 г. и 40 за 2023 г. Расхождение в общем количестве (801) и суммарном по годам (827) связано с тем, что в конце-начале каждого

года происходило перекрытие использованных данных.

Далее была выполнена атмосферная коррекция интерферограмм и процедура корректировки остаточного фазового набега (тренда). Для коррекции тропосферной задержки временного ряда развернутой интерферометрической фазы применялись данные веб-ресурса GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR) [10,11]. После этого с использованием метода Stacking-InSAR были рассчитаны поля скоростей смещений. Суть метода Stacking-InSAR сводится к суммированию взвешенных интерферометрических фаз, полученных в последовательные промежутки времени, и оценке накопленной интерферометрической фазы. Вклад каждой интерферометрической пары при суммировании зависит от её временной базы.

Рассмотрим N независимых интерферограмм с временными базами ΔT_j ($j = 1, N$) и соответствующий набор фаз φ_j после процедуры развертки. Среднюю скорость изменения фазы, описывающей смещения, можно записать в виде [6]

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

Тогда средняя скорость деформаций вдоль линии обзора радиолокатора выражается формулой

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

Здесь λ – длина волны радиолокатора.

В качестве инструмента для оценки изменений эквивалентной толщины воды использовались результаты гравиметрических измерений со спутников GRACE/GRACE-FO, которые предоставляются в свободном доступе на онлайн ресурсе [12]. Пространственное разрешение этих данных составляет 1×1 градус по широте и долготе.

Для анализа были использованы векторные слои основных геологических линейментов GEM GAF-DB (GEM Global Active Faults Database) [13], а также контуров подземных водоносных слоёв по данным WHYMAP (“The Worldwide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme”) [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 представлены результаты расчётов поля средних скоростей смещений, выполненных с использованием метода Stacking-InSAR

по временному ряду интерферометрических данных (801 интерферограмма) за период времени с 3 января 2019 г. по 3 сентября 2023 г. Цветовой клин характеризует скорости смещений соответствующих пикселей вдоль направления на радиолокатор Sentinel-1A/B. Соответственно положительные величины характеризуют направление смещений в сторону спутника, включая поднятие геоблоков, а отрицательные характеризуют направление от спутникового радиолокатора, в том числе опускание поверхности. Звёздочкой красного цвета обозначено расположение эпицентра землетрясения с магнитудой $M_w = 6.8$, происходившего на территории Марокко 8 сентября 2023 г. Синими линиями показаны контуры подземных водоносных слоёв [14].

Смещения с положительным знаком (градации коричневого цвета на рис. 1) соответствовали, в значительной степени, участкам гористой местности. Это соответствовало поднятию за счёт постепенного надвига двух тектонических плит друг на друга [7].

Наибольший интерес представляла локальная динамика участков, представленная тёмно-зелёным цветом на рис. 1. Так, несмотря на небольшие средние величины скорости смещений, максимальные значения скорости удаления вдоль направления на спутник наблюдались для небольшого участка исследуемой территории, показанного стрелкой чёрного цвета на рис. 1: в 2019 г. они составляли $15 \div 16$ см/год, к 2022 г. возрастали до 20 см/год, а за 8 месяцев 2023 г. составили величину порядка 24 см/год.

На рис. 2 представлены результаты оценок средних отрицательных скоростей смещений за год изменявшихся в пределах от -2.5 до -20 см, полученным по годичным данным за период времени с 2019 г. по 2022 г. и за 8 месяцев 2023 г. Цвета контуров водоносных горизонтов показаны синими линиями, аналогично таковым, показанным на рис. 1. Чёрными линиями с засечками на рис. 2 показаны активные разломы [13]. Эти и другие результаты в соответствие с современными тенденциями представлены на веб-странице [15], где с использованием ГИС технологий можно более наглядно ознакомиться с различными комбинациями информационных слоёв.

Первые локальные проседания поверхности в 2019 г. отмечались на участке, показанном чёрной стрелкой на рис. 1, в пределах водоносного слоя, который на рис. 2 обозначен как ВГ-1. Контур водоносного горизонта ВГ-2, расположенный севернее Атласских гор, также, как и

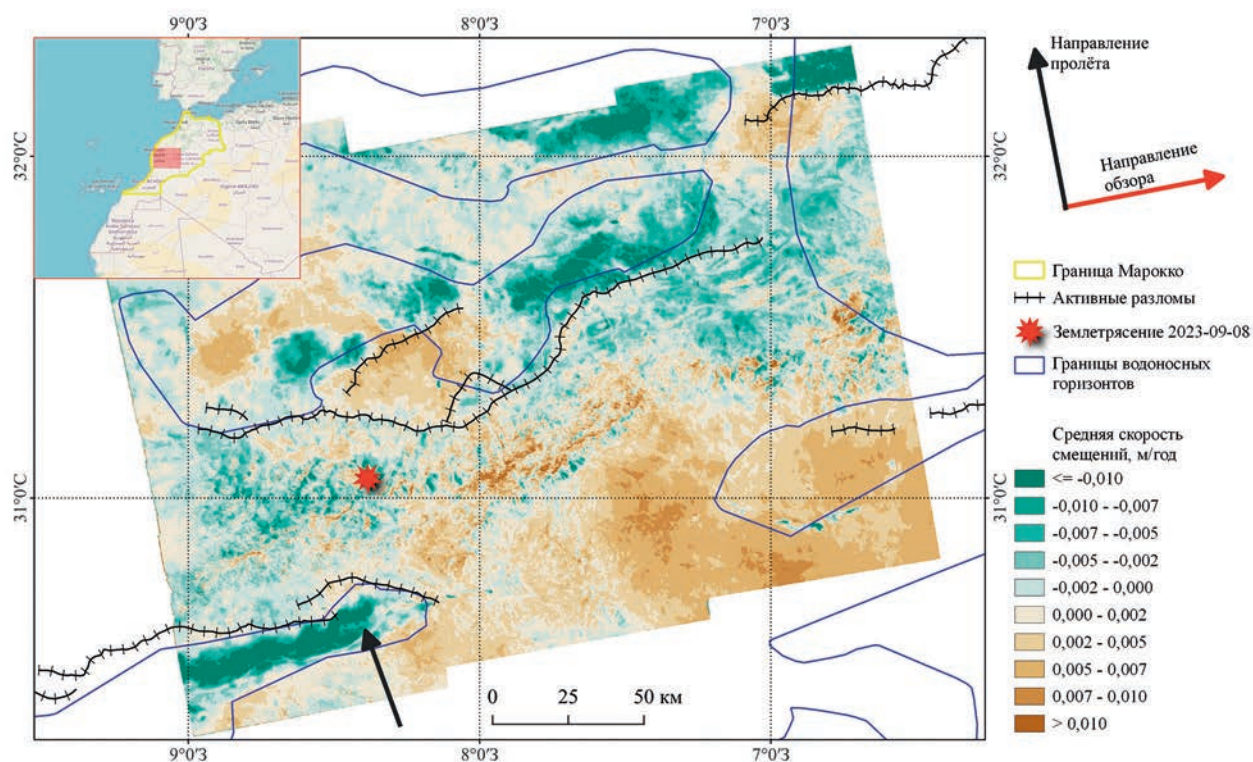


Рис. 1. Поле средних скоростей смещений с января 2019 по сентябрь 2023 г.

контур ВГ-1, приурочен долине с соответствующей развитой сельскохозяйственной мелиоративной системой.

Необходимо отметить, что опускания поверхности в пределах контура ВГ-2 начались в 2022 г. и существенно расширились, в том числе за пределы этого контура в 2023 г. При этом произошло своеобразное смыкание/объединение с другим контуром водоносного слоя, расположенным севернее (см. рис. 2). Это связано, вероятно, с чрезмерно интенсивным отбором воды из подземных горизонтов в районе г. Марракеш, который расположен в этой зоне опускания земной поверхности.

Контур ВГ-3 соответствует склону горы, где отсутствуют сельскохозяйственные поля и оросительные системы. Здесь поле скоростей смещений направлено в противоположную сторону по сравнению с другими контурами.

Обнаруженные участки аномальных проседаний земной поверхности приурочены, в большей степени, к контурам подземных водоносных слоёв, а указанные выше максимальные величины таких проседаний соответствуют сельскохозяйственным полям и садам с разветвлённой сетью мелиоративных водоёмов и каналов.

Это связано с тем, что в засушливых районах многие виды деятельности и состояние природных экосистем в значительной степени зависят от наличия воды. В Марокко рост потребностей в воде в сочетании с уменьшением количества осадков, вызванным изменением климата, привело к значительному уменьшению объёма грунтовых вод. Так, в работе [16], опубликованной в 2020 г., указывалось, что за последние 30 лет было зафиксировано снижение уровня подземных вод с 20 до 65 м, связанное с климатическими изменениями. Столь аномальное снижение уровня воды в подземных горизонтах стало причиной локальных опусканий земной поверхности. Для исследуемой территории была получена также временная динамика количества осадков по данным [17].

На рис. 3 иллюстрируются результаты гравиметрических измерений, по данным спутников GRACE (кривая синего цвета), а также данные по количеству осадков [17] (кривая серого цвета с линейной аппроксимацией) в этом регионе. На этом рисунке по оси абсцисс указаны даты измерений, по левой оси ординат указана толщина эффективного слоя воды (ТЭСВ), полученная по данным спутников GRACE/GRACE-FO, а по

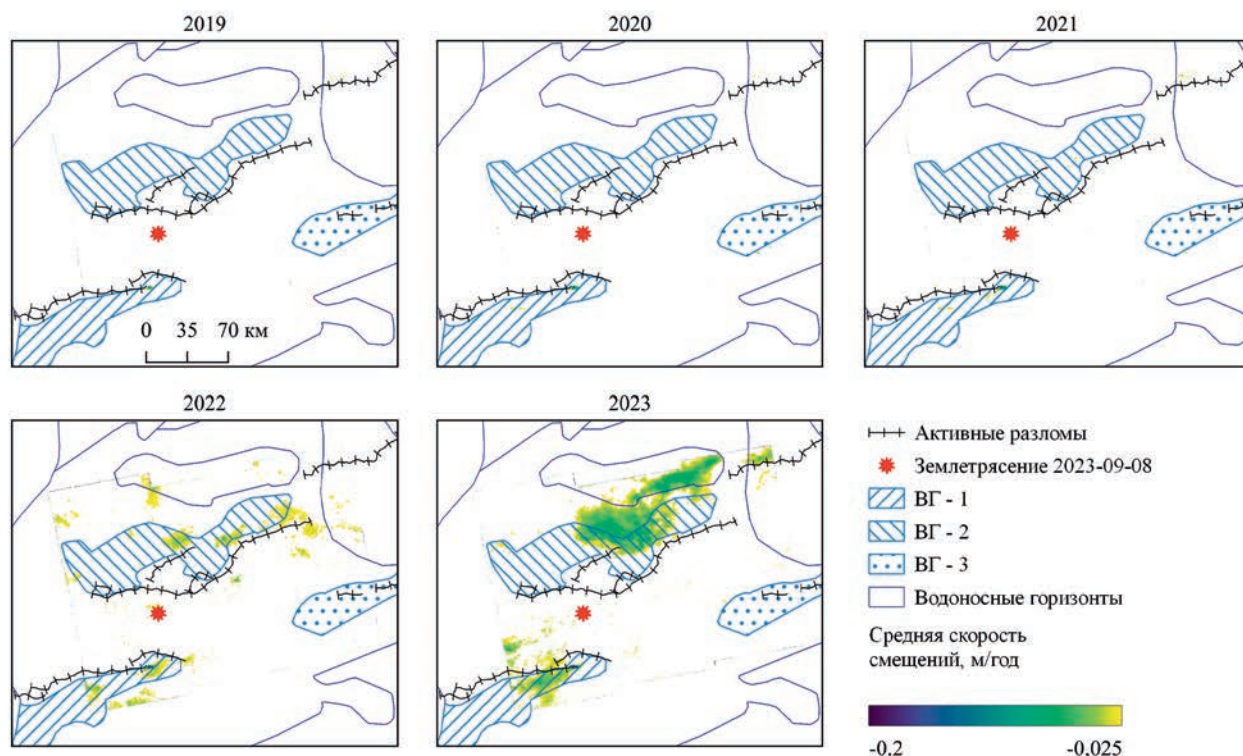


Рис. 2. Поле средних отрицательных скоростей смещений за год. ВГ — водоносные горизонты.

правой оси ординат указано количество осадков. Как указывалось, выше спутники GRACE/GRACE-FO обеспечивают проведение гравиметрических измерений с пространственным разрешением 1×1 градус.

Анализ рис. 3 показал, что после достижения максимальных значений ТЭСВ, составляющих +6 см в 2010–2011 гг., отмечалось резкое снижение ТЭСВ до величины -1 в начале октября 2013 г. Это значение, с незначительными изменениями, сохранялось до даты землетрясения с магнитудой $M_w = 4.8$, происходившего в этом районе 31 августа 2014 г. (см. вертикальный красный пунктир на рис. 3). Далее отмечался локальный максимум ТЭСВ, достигавший +4.7 см в апреле 2015 г., связанный с предшествующим максимумом осадков. После чего ТЭСВ уменьшалась до -11 см, т.е. на величину порядка 15–16 см (см. рис. 3). В тоже время данные по осадкам (серая кривая на рис. 3) демонстрировали относительную сезонную стабильность на долговременных периодах с 2002 по 2023 гг.

Подобная ситуация описана в работе [18] для территории Ближнего Востока. В этой работе по данным спутниковой гравиметрии отмечалось существенное снижение ТЭСВ, что объяснялось

антропогенным влиянием, а в то же время отмечалась стабильность количества осадков. Авторы работы [18] объясняли это тем, что происходил “хищнический отбор воды оросительными системами, в том числе извлекаемых многочисленными скважинами”. Вследствие такого изъятия воды из подземных слоёв происходило значительное уменьшение ТЭСВ, поскольку вода, используемая для полива растительности, в большей степени испаряется. Сходные во многом для стран Ближнего Востока и Марокко климатические условия, а также развитая оросительная система и указывают на подобное антропогенное влияние.

На рис. 4 а представлены косейсмические деформации по данным интерферометрической пары Sentinel-1 для 3 сентября 2023 г. и за 15 сентября 2023 г. На рис. 4 б — изосейсты для сейсмического события с магнитудой $M_w = 4.8$, состоявшегося 31 августа 2014 г. (чёрный цвет) и для сейсмического события с магнитудой $M_w = 6.8$, состоявшегося 8 сентября 2023 г. (красный цвет). Изосейсты были получены с использованием программного обеспечения ShakeMap® [19].

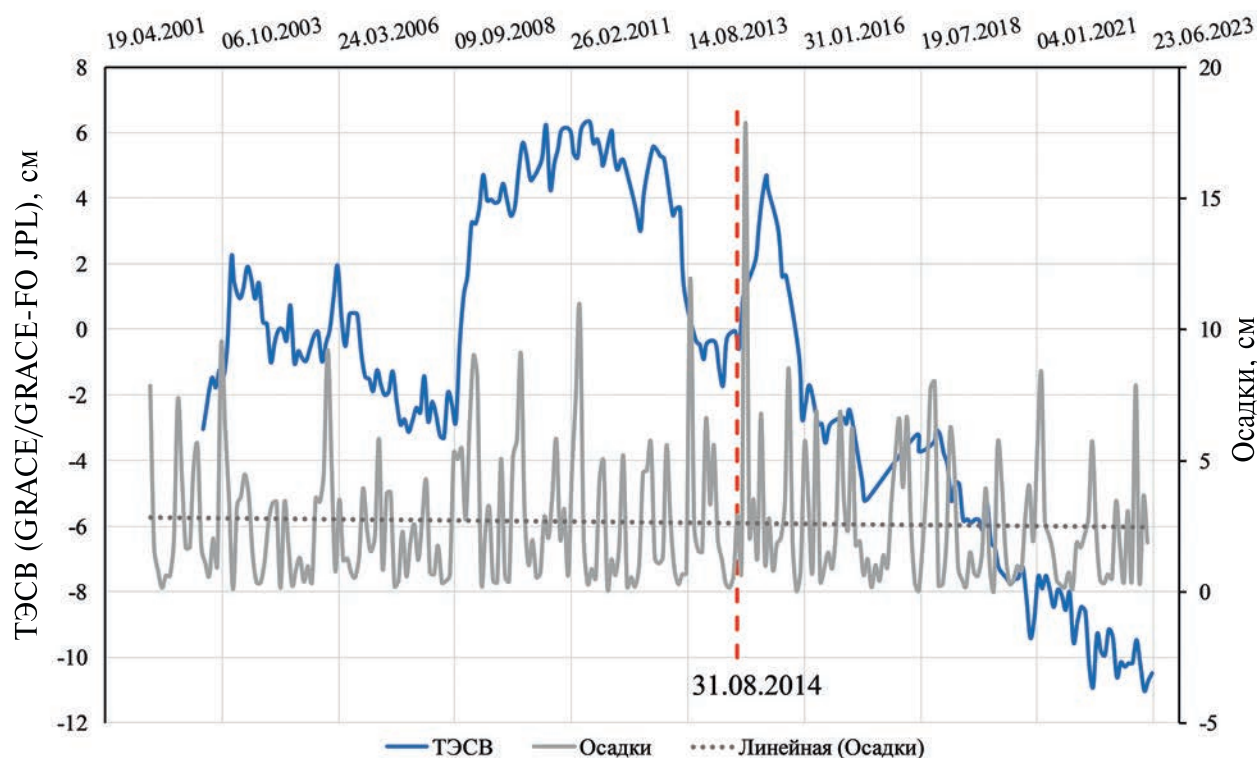


Рис. 3. Временная динамика толщины эффективного слоя воды (ТЭСВ) и количества осадков.

Тёмно-зелёным цветом на рис. 4 б показаны участки поверхности со средними скоростями опускания более 5 мм/год.

Анализ полученных результатов радиолокационной интерферометрии Sentinel-1 за период времени с 2019 г. до 2023 г., а также спутниковой гравиметрии GRACE/GRACE-FO за период времени с 2003 г. до 2023 г. показал следующее:

- Обнаружена динамика опусканий земной поверхности с усредненной за период времени 2019–2023 гг. скоростью, составлявшей величину порядка 1.5 см/год, а также обширные по площади опускания поверхности над водоносными горизонтами с максимальными величинами до 24 см за 8 месяцев 2023 г., (см. рис. 2). Установлено, что в 2023 г. суммарная площадь опускания земной поверхности составляла величину порядка 8 тыс. км². Площади опусканий располагались в северной и южной частях участка Атласских гор. Между зонами этих опусканий располагался очаг землетрясения, происходившего 8 сентября 2023 года с магнитудой $M_w = 6.8$.
- За период времени с 2015 по 2023 гг. толщина эффективного слоя воды для фрагмента земной поверхности размером 1×1 градус,

соответствующего области радиолокационных измерений, уменьшилась на 15–16 см (см. рис. 3). Вместе с тем в период резкого понижения ТЭСВ в 2013–2014 гг., в этом же районе 31 августа 2014 г. произошло землетрясение с магнитудой $M_w = 4.8$ (см. вертикальный пунктир красного цвета на рис. 3). Эпицентр этого сейсмического события 2014 г. (обозначен звёздочкой чёрного цвета на рис. 4 а) располагался на периферии зоны косейсмического поднятия, произошедшего в результате землетрясения 8 сентября 2023 г. с магнитудой $M_w = 6.8$ (эпицентр обозначен звёздочкой красного цвета на рис. 4 а), и афтершоков, показанных треугольниками жёлтого цвета на рис. 4 а. В этой области сейсмические события с магнитудами $M_w \geq 4.5$ за период времени с 2014 по 2023 годы не регистрировались, а эпицентры сейсмичности с магнитудами более 2.5 показаны кружками зелёного цвета на рис. 4 а.

В предположении сходности затуханий интенсивностей подвижек при распространении сейсмических волн в различных направлениях из близких очагов (расстояния порядка 37 км) сравним изосейсты для сейсмических событий

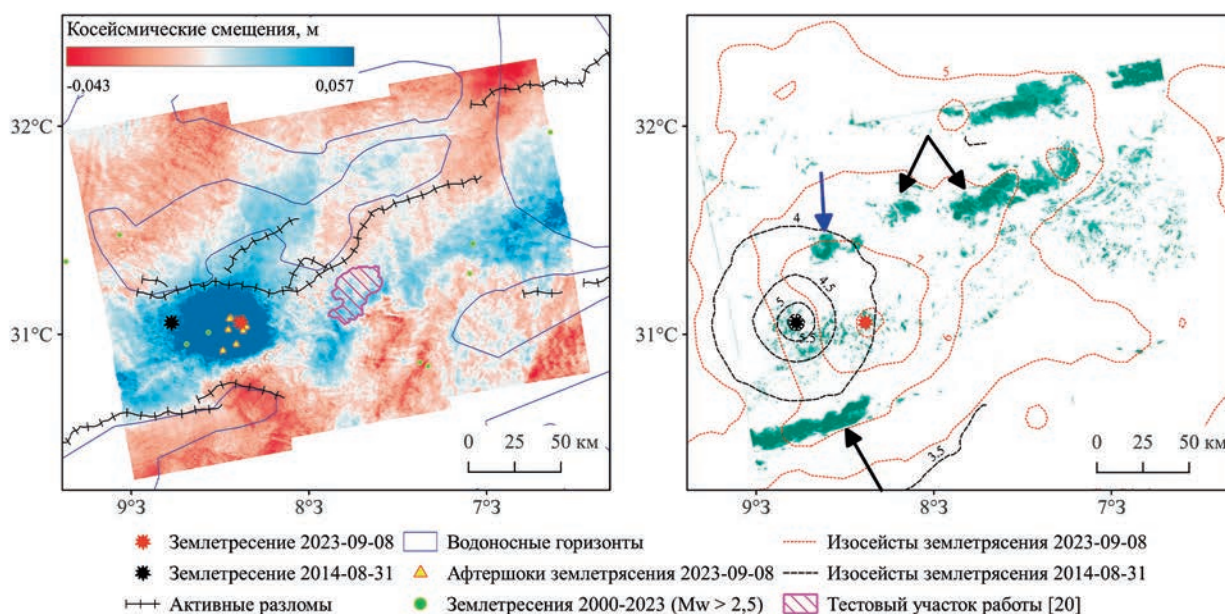


Рис. 4. Результаты радарной интерферометрии: (а) — косейсмические деформации по данным интерферометрической пары Sentinel-1 для 03.09.2023 и 15.09.2023 г., (б) — изосейсты для сейсмических событий, состоявшихся в 2014 г. (чёрный цвет) и для сейсмического события, состоявшегося 8 сентября 2023 г. (красный цвет).

2014 (чёрный цвет на рис. 4 б) и 2023 (красный цвет на рис. 4 б) гг.

Анализ изосейст для двух сейсмических событий различной интенсивности происходивших в 2014 и 2023 годах (на рис. 4 б интенсивности указаны в баллах по модифицированной шкале Маркалли (MMI) [19]), показал, что их конфигурации существенно различаются. Форма изосейст различных интенсивностей (указаны у изосейст) для землетрясения 2014 г. сходна и близка к окружности. Изосейста для интенсивности 5.5 баллов фактически локализована в непосредственной близости от эпицентра, а изосейсты для интенсивностей 3 и 3.5 баллов были расположены вне участка зоны исследуемой территории, поэтому информативны только изосейсты для интенсивностей 4, 5 и 5.5 баллов (по шкале MMI), указанные на рис. 4 б.

В распределении макросейсмических проявлений землетрясения, происходившего 8 сентября 2023 г. с магнитудой $M_w = 6.8$, выявлены следующие закономерности:

- 7-ми-балльная изосейста отклоняется от круговой формы и охватывает участок опускания поверхности, показанный синей стрелкой на рис. 4 б;
- 6-ти-балльные макросейсмические эффекты охватывают участки опускания поверхности

(показаны стрелками чёрного цвета на рис. 4 б) за счёт чего изосейста также отклоняется от круговой формы;

- 5-ти-балльная изосейста также значительно отличается от формы круга за счёт вытянутости участков деформаций в направлениях к востоку и северо-востоку от эпицентра (см. рис. 4 б).

Эти особенности могут быть связаны с тем, что параметры среды распространения сейсмических колебаний изменились за период времени между землетрясениями, происходившими в 2014 г. и 2023 годах, вследствие отбора значительных объёмов воды из подземных горизонтов и связанного с этим оседания поверхности. Также можно предположить, что значительное уменьшение объёма воды горизонтов ВГ-1 и ВГ-2, граничащих с разломами (см. рис. 2), вызвало увеличение напряжения вдоль них по направлениям с северной и южной сторон Атласских гор. А это, в совокупности с конвергенцией евразийской и нубийской плит послужило причиной землетрясения с магнитудой $M_w = 6.8$, произошедшего 8 сентября 2023 года, эпицентр которого располагался между участками опускания земной поверхности.

В дополнение необходимо отметить следующее. Результаты изотопного анализа снега на

тестовом участке Атласских гор, а также воды из различных подземных горизонтов показали, что сезонный пик общего объёма накопленной воды, наблюдался в марте, а затем происходило его значительное снижение в период с марта по июнь [20]. Землетрясения же, состоявшиеся 31 августа 2014 г. и 8 сентября 2023 г., происходили с задержкой в два месяца после завершения указанного значительного сезонного снижения объёма воды. Это может быть связано с некоторым удалением используемого тестового участка (показан заштрихованным контуром сиреневого цвета в центре рис. 4 а) от эпицентров исследуемых сейсмических событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов спутниковой радиолокационной интерферометрии за период времени 2019–2023 гг. и спутниковой гравиметрии за период времени 2000–2023 гг. показал уменьшение ТЭСВ на 15–16 см (при площади измерений 1×1 градус по широте и долготе) и опускания земной поверхности над водоносными горизонтами, при этом суммарная площадь опусканий к середине 2023 г. составила 8 тыс. км². На основании этого сделано предположение о значительном уменьшении объёма и соответственно массы воды в подземных горизонтах, граничащих с разломами по обе стороны Атласских гор, что приводит к эффекту, обратному наполнению водохранилищ (увеличение массы воды). Эффект наполнения водохранилищ и связанное с ним увеличение сейсмичности в различных регионах мира отмечено, например, в работе [21]. В этой работе на примере водохранилищ Койна и Варна показано, что расположение и размеры областей наведённой сейсмичности определяются размерами и локализацией областей повышенных напряжений, создаваемых весом водохранилищ. Как известно, повышение напряжённо-деформированного состояния земной коры вызывает рост сейсмической активности [22].

В случае землетрясений, происходивших на территории Марокко в 2014 и 2023 гг., роль, обратную водохранилищам, выполняли водоносные горизонты, стремительное истощение которых отмечалось соответственно с 2012 г. до момента землетрясения, происходившего 31 августа 2014 г., а затем с 2015 до землетрясения, происходившего 8 сентября 2023 г. При этом на эти долговременные тренды понижения ТЭСВ, регистрируемых по данным спутниковой гравиметрии GRACE/GRACE-FO, накладывалось сезонное уменьшение объёмов пополнения

водных ресурсов за счёт таяния снега в горах. Такое уменьшение объёмов воды в водоносных горизонтах связано с интенсивным использованием воды при мелиоративных мероприятиях, а также из-за изменения климата, приводящими к повышению температуры, и связанными с этим увеличением потребления воды, а также ростом её испарения, особенно в летние месяцы.

Соответственно, при существенном снижении уровня подземных вод изменилось напряжённо-деформированное состояние вдоль границ этих водоносных горизонтов, совпадающих с основными разломами исследуемого сейсмоопасного региона на территории Марокко. Это послужило триггерами для землетрясения с магнитудой $M_w = 6.8$, произошедшего 8 сентября 2023 г. а также для землетрясения с магнитудой $M_w = 4.8$, произошедшего 31 августа 2014 г. Такими триггерами могут являться и другие явления, например аномальное изменение атмосферного давления, описанными в работе [23].

Полученные результаты продемонстрировали перспективность спутниковых методов для мониторинга сейсмоопасных территорий. Совместно с методами моделирования, например, описанными в работах [24, 25] эти методы позволят повысить эффективность предупреждения и снизят негативные последствия таких природных катастроф, как сильные землетрясения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственных заданий НИИ “Аэрокосмос” и ИФМ СО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы утверждают об отсутствии к ним конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cheloni D. et al.* The 8 September 2023, MW 6.8, Morocco Earthquake: A Deep Transpressive Faulting Along the Active High Atlas Mountain Belt // *Geophysical Research Letters*. 2024. V. 51. № 2. P. e2023GL106992.
2. *Михайлов В. О. и др.* Землетрясения в Турции 06.02.2023: модель поверхности разрыва по данным спутниковой радарной интерферометрии // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. P. 71–77.

3. Овсяченко А. Н. и др. Хубсугульское землетрясение 12.01.2021 с $M_w = 6.7$ в северной Монголии: геологические эффекты и тектоническая позиция очага // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. Р. 65–70.
4. Бондур В. Г. и др. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 г. на Южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии // Доклады Российской Академии Наук. Науки О Земле. 2021. Т. 499. № 2. Р. 144–150.
5. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В. Аномальная геодинамика перед землетрясением 2023 г. В Турции по данным спутниковой радарной интерферометрии 2018–2023 гг. // Исследование Земли Из Космоса. 2023. № 3. Р. 3–12.
6. Zhang L. et al. Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR: 18 // Remote Sensing. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2021. V. 13. № 18. P. 3662.
7. Billi A. et al. Retracing the Africa–Eurasia nascent convergent boundary in the western Mediterranean based on earthquake and GNSS data // Earth and Planetary Science Letters. 2023. V. 601. P. 117906.
8. GRACE Tellus [Electronic resource] // GRACE Tellus. URL: <https://grace.jpl.nasa.gov/> (date of application: October 16, 2023).
9. Hogenson K. et al. Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-native infrastructure for generic processing of SAR data. Zenodo, 2020.
10. Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) [Electronic resource] // Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS). 2024. URL: <http://www.gacos.net>
11. Yu C. et al. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. V. 123. № 10. P. 9202–9222.
12. GRACE(-FO) Data Analysis Tool | Data [Electronic resource] // GRACE Tellus. URL: <https://grace.jpl.nasa.gov/data/data-analysis-tool> (date of application: October 16, 2023).
13. Styron R., Pagani M. The GEM Global Active Faults Database // Earthquake Spectra. SAGE Publications Ltd STM. 2020. V. 36. № 1_suppl. P. 160–180.
14. BGR – WHYMAP [Electronic resource]. URL: https://www.whymap.org/whymap/EN/Home/whymap_node.html (date of application: January 19, 2024).
15. Earthquake in Morocco September 8, 2023 (M 6.8). URL: <https://omdoki.nextgis.com/resource/1095/display> (date of application: January 19, 2024).
16. Hssaisoune M. et al. Moroccan Groundwater Resources and Evolution with Global Climate Changes: 2 // Geosciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2020. V. 10. № 2. P. 81.
17. ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis [Electronic resource] // Google for Developers. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_LAND_MONTHLY_AGGR (date of application: January 19, 2024).
18. Киселёв А. В. и др. Индикация опасных природных явлений вариациями гравитационного поля Земли (по данным спутниковых съёмок системой GRACE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. Р. 13–28.
19. ShakeMap 4 Manual — ShakeMap Documentation. URL: <https://usgs.github.io/shakemap/> (date of application: January 19, 2024).
20. Rhoujjati N. et al. Snowpack and groundwater recharge in the Atlas mountains: New evidence and key drivers // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2023. V. 49. P. 101520.
21. Смирнов В. Б. и др. О динамике сезонных компонент наведенной сейсмичности в области Койна-Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2018. № 4. Р. 100–109.
22. Бондур В. Г. и др. Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // ДАН. 2010. Т. 430. № 3. Р. 400–404.
23. Бондур В. Г. и др. Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // ДАН. Т. 414. № 4. Р. 540–543.
24. Бондур В. Г. и др. Эволюция Напряженного Состояния Южной Калифорнии На Основе Геомеханической Модели И Текущей Сейсмичности // Физика Земли. 2016. № 1. Р. 120–132.
25. Бондур В. Г., Гарагаш И. А., Гохберг М. Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций на примере Южной Калифорнии // ДАН. 2016. Т. 466. № 5. Р. 598–601.

INDUCED SEISMICITY EFFECT IN MOROCCO CAUSED BY THE REDUCED VOLUME OF UNDERWATER ACCORDING TO STACKING-INSAR AND GRAVIMETRIC DATA

Academician of the RAS **V. G. Bondur^{a, #}**, **T. N. Chimitdorzhiev^b**, **A. V. Dmitriev^b**

^a*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation*

^b*Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russian Federation*

[#]*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info*

Using Sentinel-1 satellite radio interferometry data, the geodynamics in the area of the epicenter of the destructive $M_w = 6.8$ earthquake that occurred in Morocco on September 8, 2023, were studied using the Stacking-InSAR method applied to 801 interferograms. Over the period from January 2019 to September 2023, local surface subsidence with an average speed of 1.5 cm/year was discovered, and the maximum speed was identified in 2023 and amounted to 24 cm/year, for areas with a developed melioration system located above aquifers. Based on an integrated analysis of changes in the water equivalent thickness, measured from satellite gravimetric data for 2000–2023, and the amount of precipitation, it was found that the surface subsidence was due to a huge irrigation draft. Assuming the similarity of shapes of isoseists of earthquakes with close epicenters, a comparison of the isoseists of earthquakes that occurred in 2014 and 2023 was carried out, which made it possible to identify the expansion of the contours of the isoseists towards the descending surface areas for the earthquake from 2023. This process, along with the tectonic movements of the Eurasian and Nubian plates, is believed to increase the stress-strain state between two aquifers, what caused the $M_w = 6.8$ earthquake in Morocco on September 8, 2023.

Keywords: SAR interferometry, satellite gravimetry, Stacking-InSAR, seismicity, isoseists, surface subsidence, aquifers