

СОВРЕМЕННЫЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ ВЫСОТНЫХ ОТМЕТОК ПОВЕРХНОСТИ СУШИ

© 2022 г. А. Л. Энтин^{1,*}, П. Г. Михайлюкова¹, А. И. Кедич^{1,2}, С. В. Харченко^{1,2}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет,
Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*E-mail: aentin@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 10.05.2021 г.

После доработки 07.12.2021 г.

Принята к публикации 10.01.2022 г.

Статья посвящена анализу возможностей использования метода радиолокационной интерферометрии для количественной оценки темпов современных рельефообразующих процессов. Метод дифференциальной радиолокационной интерферометрии (DInSAR) основан на радиолокационной съемке земной поверхности, выполняемой с космических аппаратов, чья орбитальная траектория зафиксирована с высокой точностью. Это дает возможность, измеряя разницу фаз отраженного радиосигнала над одними и теми же участками земной поверхности через фиксированный интервал времени, определять величины изменений абсолютной высоты участков суши по линии визирования сенсора спутника, вертикали или горизонтали. Этот метод, при том, что он обладает значительными ограничениями, позволяет практически в режиме реального времени отслеживать изменения рельефа, обусловленные воздействием различных геоморфологических процессов. Традиционные области применения DInSAR — мониторинг техногенных просадок или подсыпок грунта, сеймогенных и вулканогенных подвижек поверхности, оползней и других склоновых процессов, криогенного преобразования рельефа. В пределах этот метод при использовании радарных снимков в С-диапазоне (например, спутники-близнецы Sentinel-1A и -1B) позволяет различать субсантиметровые вертикальные движения. При этом периодичность съемки составляет 1–2 нед, покрываемые площади могут составлять от сотен м² до десятков тысяч км². Характерные регистрируемые вертикальные скорости в различных публикациях меняются в интервале от первых см/год до 1 м/событие, а иногда более (в случае землетрясений или оползней). В качестве примера использования данного метода приведен результат расчета изменений высотных отметок земной поверхности на междуречье рек Енисея и Большой Хеты — они составили от –3 до +2 см за период менее двух недель в июле–августе 2019 г. и были связаны с флювиальными и термокарстовыми процессами.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, изменение отметок высот, геоморфологические процессы, Sentinel-1

DOI: 10.31857/S0435428122020067

ВВЕДЕНИЕ

Материалы радиолокационной интерферометрической съемки (РИ) широко применяются для создания цифровых моделей рельефа, измерения небольших движений земной поверхности (ЗП) и изучения процессов и явлений, вызывающих эти движения. Этого удастся достичь благодаря высокой чувствительности метода — имея пару наборов радиолокационных данных на одну и ту же территорию, полученных с небольшим интервалом времени, можно оценивать вертикальные движения порядка первых сантиметров по величине [1]. К другим преимуществам РИ относится ее всепогодность: съемку можно выпол-

нять даже в условиях сильной облачности, что недоступно оптическим сенсорам (однако нельзя забывать, что метеорологические условия, не ограничивая съемку напрямую, все же вносят коррективы в ее результат). Среди недостатков этого метода обычно указывают высокую стоимость получения материалов, подверженность зашумлению различного рода, а также заметные ухудшения качества результата в случае изменения диэлектрических свойств поверхности между съемками [2].

РИ наиболее часто используется для мониторинга изменений поверхности суши вследствие активного техногенного воздействия: разработки полезных ископаемых, промышленного и граж-

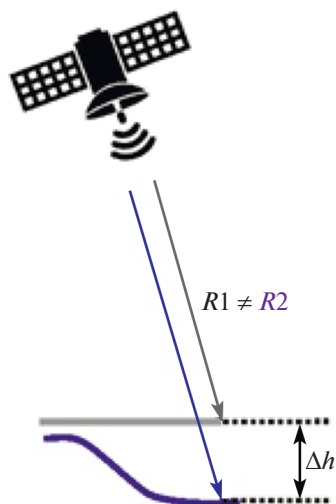


Рис. 1. Принцип дифференциальной радиолокационной интерферометрии. Синим и серым цветом показаны положение объекта земной поверхности и наклонная дальность до него в два момента времени.

данского строительства на больших площадях. Кроме того, значительное число работ посвящено изучению последствий землетрясений и связанных с ними движениям земной коры. Имеются примеры исследований по мониторингу оползневой активности и вулканических извержений. При том, что по поднятой проблеме — использования РИ для установления темпов изменения отметок земной поверхности — существует масса работ, лишь малую часть из которых можно упомянуть в этой статье, практически отсутствуют систематизации геоморфологической значимости этого метода.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ВЫСОТЫ ПОВЕРХНОСТИ СУШИ

В результате интерферометрической обработки радиолокационных изображений (РЛИ) возможно получить как абсолютные высоты местности, так и значения перемещения земной поверхности по разным направлениям (по линии визирования (LOS — line of sight), по вертикали, горизонтали, вниз по склону).

Принцип, который лежит в основе радиолокационной интерферометрии, заключается в использовании фазовой компоненты последовательных радиолокационных изображений (минимум двух). Исследуемый объект земной поверхности снимается с небольшим промежутком времени (периодичность съемки зависит от выбранного радиолокатора) практически с одного и того же положения космического аппарата — КА. В этом случае расстояние от радиолокатора до объекта должно

быть неизменным и значение фазы вернувшегося сигнала также остается неизменным. Однако если положение поверхности объекта меняется, то меняется и расстояние, которое преодолевает сигнал от радиолокатора до объекта (рис. 1). Соответственно, меняется значение фазовой компоненты отраженного радиолокационного сигнала (фаза второго РЛИ оказывается несколько сдвинутой относительно первого). Разность фаз двух сигналов и характеризует изменение отметок земной поверхности за период между двумя космическими съемками.

При выборе исходных РЛИ важно учитывать значение интерферометрической базы (расстояние между положением радиолокатора в моменты выполнения съемки), которая не должна превышать 100 м для тех пар РЛИ, по которым будут рассчитываться значения изменений высоты. Поскольку интерферометрическая база между двумя положениями радиолокатора никогда не будет равна нулю, то полученная разность фаз ($\Delta\phi$) будет содержать не только компоненту, характеризующую изменение высот земной поверхности за период между съемками ($\Delta\phi_d$), но и такие компоненты, как фазы, характеризующие рельеф земной поверхности ($\Delta\phi_r$), атмосферные флуктуации ($\Delta\phi_a$), шумы приемной системы ($\Delta\phi_m$), а также всегда присутствует неизвестная начальная разность фаз ($\Delta\phi_0$) [3]:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_r + \Delta\phi_d + \Delta\phi_a + \Delta\phi_m + \Delta\phi_0.$$

Целью интерферометрической обработки является извлечение $\Delta\phi_d$ из приведенной формулы. Влияние шумов приемника и наличия начальной разности фаз незначительно, этими компонентами пренебрегают. Устранение влияния атмосферных неоднородностей довольно трудоемкий процесс и зачастую влияние атмосферы неустранимо. Однако его можно уменьшить путем использования больших массивов РЛИ или привлечения дополнительных источников информации (например, GPS-измерения) [4–8].

Существенный вклад в $\Delta\phi$ вносит компонента, характеризующая рельеф земной поверхности ($\Delta\phi_r$). Для того, чтобы ее убрать, необходимо включать в обработку дополнительную цифровую модель рельефа (ЦМР). Чаще всего для этого используют глобальные и крупнорегиональные наборы данных о высотах, имеющие несколько более “грубое” пространственное разрешение — например, фрагменты цифровой модели поверхности SRTM.

В настоящее время существует несколько разновидностей интерферометрической обработки, отличающихся главным образом количеством используемых РЛИ. Самый простой метод — *двухпроходная дифференциальная интерферометрия* — использует только два изображения, по которым

с привлечением опорной ЦМР рассчитываются величины изменений высот, произошедшие в период между двумя съемками. В *трехпроходной интерферометрии* выполняется обработка трех РЛИ, два из которых получены в тот период, когда исследуемый объект был еще стабилен. Третье изображение должно быть получено после произошедших изменений и тогда в паре с одним из двух первых оно содержит информацию о рельефе и его изменениях. Таким образом, возможно выделить компоненту, отвечающую изменению высот ЗП. В *четырёхпроходной интерферометрии* участвуют четыре изображения — два из них должны быть сделаны до события, изменившего рельеф местности, а два других — после. В этом случае формируются две разностно-фазовые картины, на основе разности которых оцениваются изменения рельефа.

Использование двух-, трех-, четырехпроходной интерферометрии не позволяет уменьшать влияние атмосферы. Внесение поправок для устранения ошибок в абсолютных значениях изменений отметок поверхности суши возможно только с привлечением результатов моделирования фазовых задержек с учетом метеорологических параметров в момент съемки.

В настоящее время интенсивно развиваются такие методы интерферометрической обработки, как метод постоянных рассеивателей (*Permanent/Persistent Scatterers*, PS) и метод малых базовых линий (*Small Baseline Subset*, SBAS), основанные на совместном использовании целых серий РЛИ [9–16]. Метод постоянных рассеивателей предполагает наличие на территории изучения однозначно распознаваемых объектов, яркостные свойства которых не претерпевают значительных изменений: здания и сооружения, небольшие участки скального грунта. Такие объекты соответствуют единичным пикселям получаемых радарных изображений; их идентификация, как правило, осуществляется программным способом в специализированном программном обеспечении [17]. При недостаточном количестве или неравномерном распределении таких объектов на местности может быть применен способ искусственных отражателей (*Artificial Reflectors*, AI) — специально размещаемых на местности металлических “целей” размером не менее 1 м [18]. Метод малых базовых линий предполагает использование множества интерферограмм, каждая из которых вычисляется на основе комбинации наборов данных, полученных с небольшим интервалом времени или с небольшого расстояния (собственно, малой базовой линии). “Уравнивание” интерферограмм и получение разностей фаз выполняются путем решения уравнений линейной регрессии в специальном программном обеспечении. Использование упомянутых методов позволяет резко ослабить влияние искажающих факторов (на-

пример, влияние неоднородностей атмосферы) и обеспечивает точность вычисления изменений рельефа — до нескольких миллиметров [19, 20]. В случае двухпроходной интерферометрии обеспечивается субсантиметровая точность вычисления. Подробно сущность и математические аспекты РИ для их фиксации рассмотрены в [21].

СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Радиолокационная съемка начала свое развитие с радиолокаторов, установленных на самолетах. Первый радиолокатор, запущенный в космос, был установлен на борту космического аппарата Seasat (запущен NASA в июне 1978 г.). Его назначением стал мониторинг состояния поверхности океанов и полярных областей — полей волн, состояния ледового покрова. Несмотря на то что аппарат функционировал всего 106 дней, он показал высокую эффективность методов радиолокационного зондирования из космоса.

Следующая эпоха развития космических радиолокаторов началась в 1991 г. с запуском космических аппаратов ERS-1 и Алмаз-1А. В течение последующего десятилетия было запущено еще несколько радиолокаторов, которые выполняли съемку в С-диапазоне (JERS-1, SIR-C, Radarsat-1, ENVISAT) и обеспечили научное сообщество большим количеством радиолокационных изображений (РЛИ), что стало толчком к развитию методических подходов к их обработке. Следует отметить, что в рассматриваемый исторический период методическими разработками занимались в основном специалисты в области физики и математики. Возможно, это являлось одной из причин того, что до середины 2000-х годов методы обработки радиолокационных данных были в основном недоступны географическому научному сообществу [22].

В середине 2000-х гг. намечается новая тенденция — создание группировок космических аппаратов для повышения периодичности съемки. В эти же годы появляются радиолокаторы, выполняющие съемку в Х-диапазоне, что приводит к повышению пространственного разрешения до первых метров (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed).

В последнее десятилетие сохраняется тенденция формирования группировок КА с радиолокаторами на борту для преемственности данных (обеспечение многолетних рядов радиолокационных изображений на одни и те же территории), а также для повышения оперативности получения данных, что актуально при мониторинге чрезвычайных происшествий. Все больше появляется радиолокаторов, снимающих в разных частотных диапазонах: X (TanDEM-X, PAZ, ICEYE и др.), C (Kompsat-5, Radarsat-2, RISAT-1), S (NovaSAR-S),

L (ALOS-1, ALOS-2). Это обеспечивает комплексное исследование выбранных территорий.

Если на первых радиолокаторах поддерживался режим съемки в одной поляризации, то современные радиолокаторы позволяют получать изображения земной поверхности в четырех поляризациях одновременно. Это позволяет развивать методы поляриметрического анализа для более точного понимания физических и структурных особенностей ландшафтов.

Важнейшим этапом в развитии областей применения радиолокационных данных стало появление первого радиолокатора Sentinel-1, данные которого (как архивные, так и оперативные) находятся в открытом доступе. В настоящий момент на орбите функционируют два радиолокатора-близнеца Sentinel-1A и Sentinel-1B, непрерывно выполняющие радиолокационную съемку Земли. РЛИ указанных радиолокаторов возможно получить в день выполнения съемки с разрешением 10 м на сушу и 40 м на морские территории. Возможность посмотреть планируемые даты съемки того или иного участка земной поверхности обеспечивает точную организацию работ для проведения необходимых подспутниковых наблюдений. Появление открытого программного обеспечения (SNAP), в котором возможно выполнять обработку РЛИ специалисту, не знающему тонкости радиолокации, позволило в разы увеличить количество исследований, где радиолокационные снимки служат как дополнительным, так и самостоятельным источником информации.

К настоящему времени разработан ряд программных продуктов для обработки радиолокационных изображений. Практически каждое из них имеет возможность интерферометрической обработки для вычисления изменений высот поверхности суши. Наибольшими функциональными возможностями обладает коммерческое обеспечение SARscape. Другое коммерческое обеспечение (Radar ERDAS Imagine — Швеция, GAMMA — Швейцария, PCI Geomatics — Канада, PHOTOMOD — Россия) не обладает явными преимуществами и позволяет выполнять обработку методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии. На рынке открытого ПО лидером в удобстве использования графического интерфейса и выполнения двухпроходной дифференциальной интерферометрии является SNAP, разработанный Европейским космическим агентством при запуске миссии Sentinel. Вне зависимости от используемого программного обеспечения, методика обработки данных не отличается для различных съемочных систем и кадров [23].

СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ГЕОМОРФОЛОГИИ

Радиолокационная интерферометрия особенно широко применяется для оценки вертикального движения земной поверхности, вызванного техногенным фактором (в частности, в антропогенной геоморфологии) — разработкой нефтегазовых, угольных и других месторождений [24–28]. Изменение высот местности на таких участках может быть вызвано как непосредственно добычей полезных ископаемых, так и движениями, вызванными последующей стабилизацией породного массива. При этом разрабатываемые месторождения являются относительно “удобной” целью для радиолокационной интерферометрии, поскольку на таких участках, как правило, отсутствует густая растительность, а также имеется развитая нивелирная сеть, позволяющая оценить точность измерений.

Опыт работ показывает, что применение метода радиолокационной интерферометрии позволяет отследить динамику высот порядка нескольких миллиметров, при этом надежно опознается изменение высот от 2 см и более. Охват территории изучения обычно определяется площадями месторождений и составляет от нескольких десятков до нескольких тысяч км². До середины 2010-х гг. в качестве исходных материалов чаще всего использовались кадры сенсоров PALSAR-1 и PALSAR-2 спутника ALOS, в настоящее время они постепенно вытесняются материалами, получаемыми со спутников Sentinel и TerraSAR/TanDEM X [см., напр., 29]. При этом получить оценку изменений более точную, чем ± 2 см, как правило, не удастся из-за временной декорреляции отраженных радиолокационных сигналов (за счет того, что локальные темпы изменений высот многократно превосходят длину волны, на которой работает сенсор КА, а корректная развертка такого фазового смещения невозможна без плавного его нарастания от краев нарушенной площади — где смещение должно быть равно нулю — к центру).

Материалы радиолокации также часто используются для оценки изменений, вызванных землетрясениями. Линейные структуры (например, разрывы), появляющиеся в результате землетрясений, можно распознавать по отдельным интерферограммам путем визуального дешифрирования. Для оценки вертикальных движений земной коры используется два и более интерферометрических изображения. Точность измерения вертикальных движений таким способом составляет порядка первых сантиметров. Площадь изучаемой территории ограничивается размерами кадров и может достигать 100×100 км. Для оценки деформаций обычно достаточно двух наборов данных — одного, полученного непосредственно

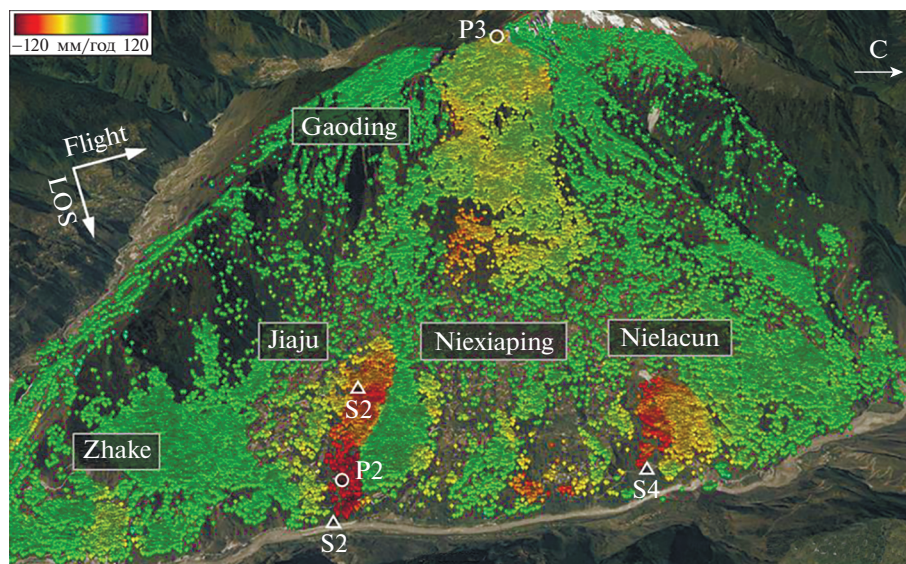


Рис. 2. Темпы изменений абсолютной высоты (мм/год) по линии визирования радиолокационного сенсора Alos Palsar для оползневой системы Никсия (*Nixia*) за период 2006–2011 гг.

перед событием, и одного, полученного некоторое время спустя (двухпроходная интерферометрия), однако для увеличения точности измерений применяются и более сложные методы.

К тематике землетрясений тесно примыкает изучение вулканизма и связанных с ним деформаций поверхности. В ряде работ [11, 30, 31] показаны возможности применения материалов радиолокационной съемки для определения площадей, охваченных вулканогенными процессами, а также для оценки изменений высот рельефа. Отметим, что изменения высот такого генезиса, как правило, значительно превышают вертикальное разрешение метода, а применение радиоинтерферометрии обусловлено не столько высокой точностью измерений, сколько всепогодностью и возможностью обеспечения повторных съемок [32].

Важным направлением применения радиолокационной интерферометрии является мониторинг оползневых и иных склоновых геоморфологических процессов [18, 33–36]. Оползни характерны для расчлененного рельефа в условиях действия переувлажнения, подмыва или других факторов, негативно влияющих на устойчивость склонов. Применение радиолокационной интерферометрии позволяет заранее предвидеть динамику грунтов и спрогнозировать сход оползня, а также, в условиях, когда оползень уже сошел, обеспечить диагностику причин его схождения. Характерные размеры склонов, на которых развиваются оползневые процессы, обычно не превышают нескольких десятков километров в плане, сами же оползни (оползневые тела и поверхности скольжения) имеют ширину от нескольких десятков метров до первых километров [34] (рис. 2).

Радиолокационная интерферометрия позволяет оценить скорости изменения высот на уровне миллиметров в год, что достаточно для прогнозирования оползания. Вместе с тем ряд факторов затрудняет применение этого метода. Первый из них — растительность: залесенность склонов ухудшает радиометрические свойства получаемых материалов и снижает когерентность пар изображений. Переувлажнение грунта, вызываемое дождями или паводками, также снижает информативность фазовых измерений. Кроме того, расчлененный рельеф приводит к появлению “слепых участков” на материалах съемки. По этим причинам довольно часто при мониторинге оползневых процессов используют искусственные уголкового отражатели.

Возможность уловить небольшие изменения высоты поверхности может быть использована для измерения динамики подвижек грунта в областях распространения вечной мерзлоты [37–39]. Как и в других случаях, метод радиолокационной интерферометрии позволяет определять изменения высот в пределах нескольких сантиметров, что подтверждается в том числе наземными геодезическими измерениями. К настоящему моменту показана пригодность метода для определения как сезонных, так и многолетних перемещений грунта, однако для получения результатов приходится использовать “продвинутые” методы обработки, такие, как SBAS. Основное затруднение при применении метода — значительные сезонные и межгодовые изменения состояния грунта, прежде всего влажности, приводящие к т.н. “дыханию грунтов”, а следовательно, вводящие метод в заблуждение относительно фактических

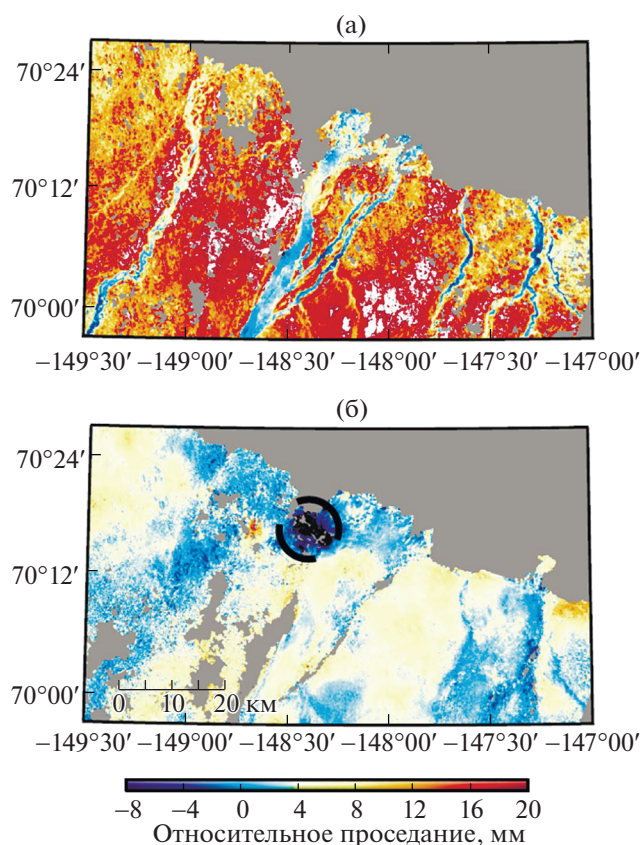


Рис. 3. Относительные изменения высоты земной поверхности за период в 5 сут (25–30 июля 1996 г.) и 2 года (сентябрь 1995 г. – сентябрь 1997 г.) в береговой зоне зал. Прадхо-Бей (Аляска). Внутригодовые сезонные и многолетние изменения отметок высот по территории могут быть разнонаправленны.

направленных, а не колебательных подвижек поверхности (рис. 3).

Для того, чтобы показать разнообразие ситуаций, в которых находит применение метод РИ в геоморфологии, серия примеров сведена в табл. 1. В ней в хронологическом порядке по каждому из типов процессов можно проследить изменения и используемых съемочных систем, и достигаемой точности результатов, и, с увеличением разрешающей способности исходных данных и метода в плане, две разнонаправленные тенденции изменения покрываемых площадей – как в сторону наблюдения, скажем, за поведением отдельного оползня, так и за рельефом территорий целых регионов и стран (например, о-ва Сицилия или Германии). В таблицу не вошли пока еще относительно редкие примеры (хотя число работ, в общем, уже измеряется десятками) мониторинга рельефа карстовых областей, участков русловых деформаций на крупных реках и др. с помощью радиолокационной интерферометрии.

В качестве примера приведем участок в 60–80 км к западу-юго-западу от г. Дудинка на междуречье Енисея и его левых притоков – р. Большая и Малая Хета. Рельеф здесь низменный, увалистый, с развитой криогенной переработкой, обширными проявлениями мерзлотных полигональных грунтов, большим числом озерно-термокарстовых котловин. Геологическое строение сравнительно простое – на мощных (сотни метров) верхнемеловых песках, глинах и алевроитах залегает четвертичный покров из среднееоплейстоценовых морских и ледниковых осадков, выходящих на дневную поверхность лишь по бортам долин и перекрытых, в свою очередь, мощными позднеоплейстоценовыми ледниковыми и озерно-ледниковыми наносами. Именно их кровля подвергается сейчас на междуречьях криогенным и термокарстовым процессам, а в дополнение активно развиваются эрозионно-аккумулятивные процессы в днищах речных долин. В силу невысокой интенсивности расчленения склоновые процессы, по-видимому, находятся в подчиненном положении и протекают локально. По паре снимков Sentinel-1В от 30 июля и 11 августа 2019 г. построена интерферограмма, из которой извлечена разность фаз, а она затем пересчитана в разницу высот. Итоговый диапазон изменений высоты заключен в интервале от -0.028 до $+0.019$ м, при этом единственный крупный ареал значимых положительных изменений приурочен только к краевой зоне съемки, собственно, междуречные пространства Енисея и Большой Хеты (слева на рис. 4) характеризуются околонулевыми значениями изменений высот (± 0.5 см), значительные (более 2 см) понижения высоты на междуречье явно характерны для отдельных озерных котловин и аласов (рис. 4, б, в), а в долинах отвечают русловым деформациям на отдельных участках. Значимых положительных изменений высот вне долин в летний период практически не фиксируется, а вот вдоль русел явно прослеживаются цепочки побочной и участки повышенной активности аккумуляции на площадке поймы (рис. 4, а). Повсеместно разбросанные концентрические ареалы понижений высоты визуальнo приурочены к уже существующим отрицательным формам рельефа, наиболее крупным из которых на участке является плоскодонный, глубиной от бровок 20–30 м алас ур. Большая Лайда (рис. 4, б, в), в строгом смысле не являющийся лайдой. По-видимому, подобные “пятна” отрицательных изменений высот свидетельствуют о продолжающемся термокарстовом процессе в теплый сезон. Построение серий таких изображений позволяет (при условии осторожной интерпретации, связанной с многочисленными техническими ограничениями метода) наблюдать тренды развития рельефа территорий практически в реальном времени. Стоит также учитывать возможность периодических ко-

Таблица 1. Примеры применения радиолокационной интерферометрии в геоморфологии

№ п/п	Регион	Процесс	Снимки	Размер участка	Темпы изменений высоты	Публикация	Год
Вулканизм							
1	Кальдера Лонг-Вэлли, Калифорния, США	Активные тектонические деформации в кальдере	ERS 1/2	580 км ²	–12– +20 см/8 лет	Hooper et al. [11]	2004
2	Вомеро и Кампи Флегреи (Флегрейские поля), Неаполь, Италия	Деформации поверхности и антропогенных объектов в области современного вулканизма	ERS 1/2	2 участка: 3 км ² и 23 км ²	< –2.2–0 см/год	Lanari et al. [13]	2004
3	Кальдера Лонг-Вэлли, Калифорния, США	Активные тектонические деформации в разломной зоне	ERS 1/2	5 тыс. км ²	<3 см/год	Tizzani et al. [16]	2007
4	Вулк. Питон-де-ла-Фурнез, Реюньон, Франция	Деформации поверхности вулканического конуса между периодами извержений	Envisat	40 км ²	5–35 см/год	Peltier et al. [14]	2010
5	Вулк. Сьерра-Негра (Санто-Томас), о-ва Галапагос, Эквадор	Деформации поверхности вулканического конуса, связанные с извержением	Envisat	Около 160 км ²	–3–0 см/год	Casu et al. [10]	2011
6	Вулк. Этна, Италия	Деформации поверхности в области современного вулканизма	ERS 1/2	350 км ²	–19–37 мм/год	Bonforte et al. [4]	2011
7	Вулк. Гекла, Исландия	Деформации поверхности в области современного вулканизма	ERS 1/2, Envisat	1300 км ²	–17–11 мм/год	Ofeigsson et al. [40]	2011
Землетрясения							
8	Коринфский залив, Греция	Деформации поверхности, связанные с землетрясениями	ERS 1/2	Около 6 тыс. км ²	–23.5–+3 см/7 лет	Chaabane et al. [5]	2007
9	Кумамото, Кюсю, Япония	Деформации поверхности, вызванные серией землетрясений	Alos Palsar 2	Десятки км ² – первые сотни км ²	–20– +18 см/событие	Fujiwara et al. [41]	2016
10	Северная Оклахома, США	Деформации поверхности, вызванные землетрясением	Sentinel-1, Radarsat-2	Около 3 тыс. км ²	–2 – +2 см/6 дней	Fielding et al. [42]	2017
11	г. Норча, Умбрия, Италия	Деформации поверхности, вызванные серией землетрясений	Sentinel-1	Первые сотни км ²	–30–+2 см/событие; –80– +10 см/событие	Roccheggiani et al. [43]	2018
12	Корякское нагорье, Камчатский край, Россия	Деформации поверхности в результате Олюторского землетрясения	Envisat, Alos Palsar 1, ERS 2	Около 25 тыс. км ²	–120– >80 см/21 месяц	Mikhailov et al. [44]	2018
13	Риджквест, Восточная Калифорния, США	Деформации поверхности, вызванные серией землетрясений	Alos Palsar 2, Sentinel-1	Тысячи км ² – десятки тысяч км ²	–0.8–+0.6 м/6 дней	Fielding et al. [45]	2020

Таблица 1. Продолжение

№ п/п	Регион	Процесс	Снимки	Размер участка	Темпы изменений высоты	Публикация	Год
Склоновые процессы							
15	Провинция Палермо, Сицилия, Италия	Продолжающиеся смещения старых оползневых тел	COSMO-SkyMed	>1300 км ²	–16.5 – +10.6 мм/год	Di Martire et al. [36]	2016
16	Карлантино, Апулия, Италия	Продолжающиеся смещения старых оползневых тел	ERS 1/2, Envisat, TerraSAR-X	<1 км ²	–0.3 – +0.8 см/год	Bovenga et al. [18]	2017
17	Бассейн р. Дадухэ, Даньба, Сычуань, Китай	Продолжающиеся смещения старых оползневых тел	Alos Palsar 1/2, Envisat	Около 5 тыс. км ²	–120 – +80 мм/год	Dong et al. [34]	2018
18	Каруаз, Анкаш, Перу	Продолжающиеся смещения старых оползневых тел	ERS 1/2, Envisat, Alos Palsar 1/2, TerraSAR-X, Radarsat-2, Sentinel-1	17 км ²	0 – >10 см/год	Strozzi et al. [35]	2018
19	Берег Буреинского водохранилища, Амурская область, Россия	Активизация оползневых процессов (пост. мониторинг)	TanDEM-X, Alos Palsar 1/2	Первые км ²	<11 см/мес.	Бондур и др. [33]	2019
Криогенные процессы							
20	Пеннинские Альпы, Швейцария	Движение каменных глетчеров	ERS 1/2	1500 км ²	<2 см/год – 2 см/день	Lambiel et al. [46]	2008
21	Прибрежная равнина Бофорта, Аляска, США	Деформация поверхности в районе развития многолетней мерзлоты (сезонные и многолетние изменения)	ERS 1/2	Около 5 тыс. км ²	0–4 см/4 месяца; –4–7 см/10 лет	Liu et al. [38]	2010
22	Дельта р. Селенга, Бурятия, Россия	Деформации поверхности, связанные с развитием криогенных процессов (морозного пучения)	Alos Palsar 1	3500 км ²	0 – +6 см/2 месяца	Чимитдоржиев и др. [39]	2011
23	Сьерра-Невада, Калифорния, США	Движение каменных глетчеров	Alos Palsar 1	>5 тыс. км ²	14–87 см/год	Liu et al. [47]	2013
24	Малый Хинган, Хэйлунцзян, Китай	Деформация поверхности в районе развития многолетней мерзлоты	Sentinel-1	Около 10 тыс. км ²	≤ 20 см/год (локально до 40 см/год)	Qu et al. [37]	2019
Техногенное воздействие							
25	Помона, Калифорния, США	Просадки, связанные с активным водозабором на территории города	ERS 1/2	320 км ²	–20 – +6 см/7 лет	Ferretti et al. [20]	2000

Таблица 1. Окончание

№ п/п	Регион	Процесс	Снимки	Размер участка	Темпы изменений высоты	Публикация	Год
26	Заполярье нефтегазокон- денстатное месторожде- ние, ЯНАО, Россия	Деформации поверхно- сти, вызываемые техно- генными просадками	Envisat	1500 км ²	1–1.5 см/год	Баранов и др. [24]	2008
27	Самотлорское нефтяное месторожде- ние, ХМАО, Россия	Деформации поверхно- сти, вызванные техно- генным просадками	Alos Palsar 1, Envisat	Около 15 тыс. км ²	–1.6– +0.9 см/год	Евтюшкин, Филатов [26]	2009
28	п. Излучинск и Излучинская ГРЭС, ХМАО, Россия	Смещение антропоген- ных объектов в районе нефтегазодобычи	Alos Palsar 1	Около 60 км ²	≤10 мм/год	Филатов и др. [27]	2011
29	Губкинское нефтегазокон- денстатное месторожде- ние, ЯНАО, Россия	Деформации поверхно- сти, вызываемые техно- генными просадками	Alos Palsar 1	Около 500 км ²	–5–+7 мм/ 2 года	Филатов и др. [28]	2012
30	Польша/Ближ- ний Восток	Просадки грунта в обла- стях открытой добычи угля и шламоотвалов, а также добычи нефтега- зового сырья	TerraSAR-X, Sentinel-1	Десятки – первые тысячи км ²	≤50 мм/год	Wasowski et al. [29]	2018

лебаний отметок высот, связанных с изменением тепло-влажностных свойств грунтов, а не с деятельностью геоморфологических процессов. Такой учет возможен следующими путями: при наличии архива погоды с близко расположенной метеостанции проверить наличие или отсутствие предпосылок к “набуханию” или, наоборот, “усыханию” субстрата – резкого изменения погодных (а на затапливаемых и подтапливаемых участках – гидрологических) условий за период, предшествующий съемке, и между съемками; верифицировать точно изменения отметок высот и вызывающие их геоморфологические процессы в полевых условиях; использовать более длинные ряды радарных изображений, чтобы отделить направленные изменения высоты от периодических и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен принцип оценки изменений высот поверхности суши с помощью радиолокационной интерферометрии (акцент сделан

на простейший метод DInSAR, лежащий в основе более сложных PSI, SBAS), а именно на вычислении разницы фаз отраженной от земной поверхности радиоволны, с которой затем связывается величина изменения отметок высот по линии визирования спутника. От нее, в свою очередь, можно перейти к изменениям высоты в вертикальной или, реже, горизонтальной плоскости (независимо от реального направления движения материальных точек на земной поверхности). В этом состоит одно из ограничений данного метода – геоморфологическая интерпретация выделенных подвижек, суждение о направлениях переноса вещества в программном виде пока удовлетворительно не реализованы, хотя, думается, это одно из возможных направлений развития методики. Предпосылки к этому имеются в возможностях по геометрическим особенностям, геоморфологической и топографической позиции соответствующего ареала подвижек – классифицировать его по возможному генезису. Среди других ограничений, в первую очередь, шумы, вызываемые атмосферной неоднородностью на

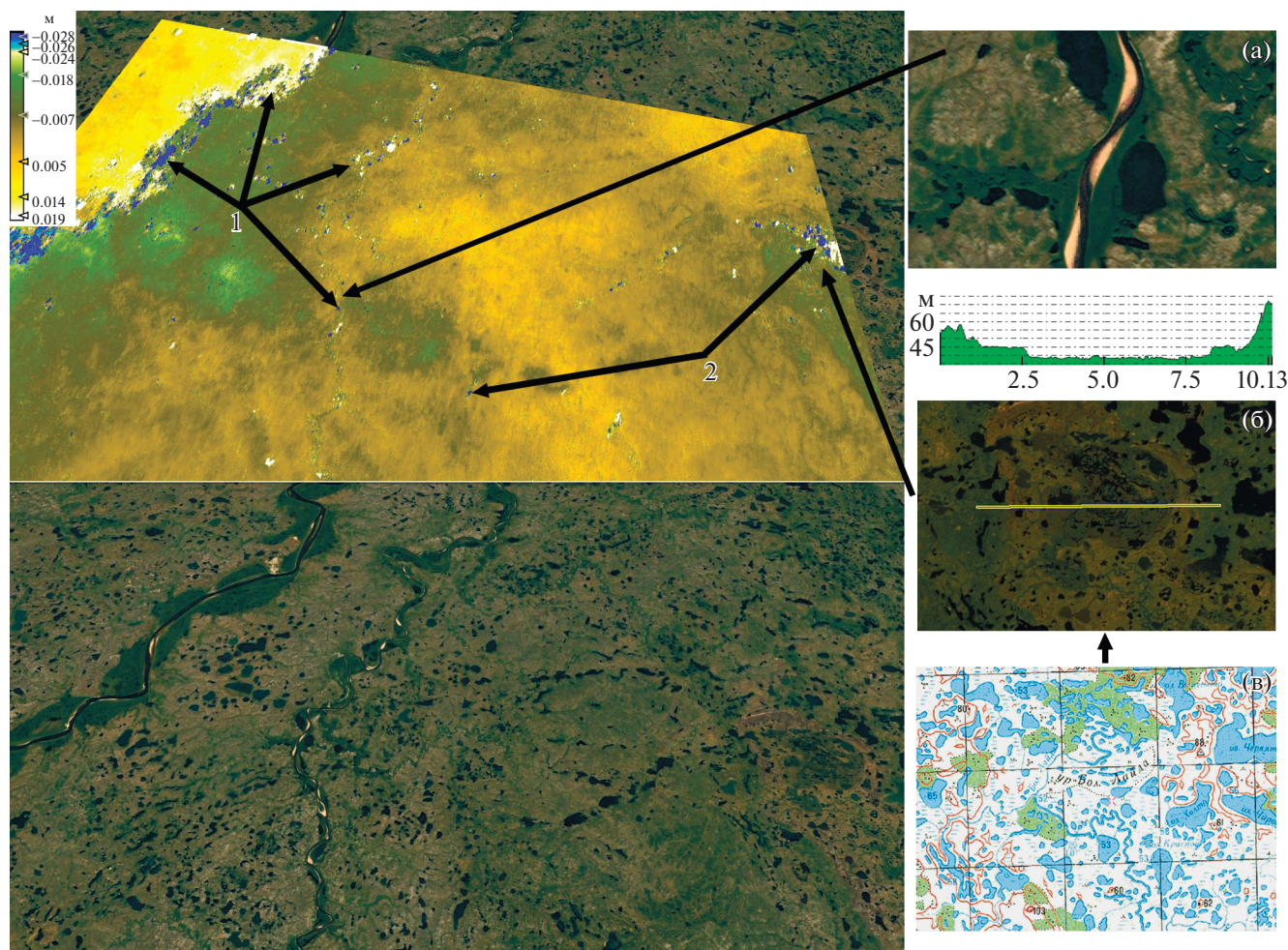


Рис. 4. Изменения отметок земной поверхности за интервал 30.07.19–11.08.19 (сверху) и перспективное космическое изображение (снизу) участка междуречья Енисея и Большой Хеты.

(а) — крупномасштабный фотоплан участка дна долины р. Малая Хета, (б) и (в) — крупномасштабный фотоплан, топографический профиль и фрагмент топографической карты окрестностей ур. Большая Лайда. Подложка — Google Earth.

Участки проявления: 1 — флювиальных процессов, 2 — предположительно термокарста.

разные временные срезы, отличиями диэлектрических свойств подстилающей поверхности (сухие грунты, увлажненные, перекрытые снежным покровом), а также наличием густой растительности. Отдельная проблема — декорреляция изображений, часто возникающая при больших интервалах между съемками, при которой невозможно надежно интерпретировать получаемую интерферограмму (один и тот же фазовый сдвиг $\Delta\varphi(-\pi; +\pi)$ может соответствовать изменению высот $\Delta\varphi \times n \times \lambda$, где λ — длина волны в радиодиапазоне, а n — коэффициент, натуральное число 1, 2, 3, ..., N). Тем не менее часто эти трудности имеют решение в виде использования серий снимков с короткими временными интервалами между съемками (а также применение методов с естественными и искусственными устойчивыми отражателями), нежели работа лишь с парой сним-

ков при большом лаге во времени между ними. Радарная интерферометрия активно применяется как для мониторинга техногенных преобразований земной поверхности, так и для слежения за сейсмогенными, вулканогенными, склоновыми, криогенными, флювиальными и другого рода трансформациями геометрической структуры рельефа. Площади, покрываемые таким мониторингом, меняются от первых сотен м^2 до десятков тысяч км^2 , а устанавливаемые величины подвижек по вертикали — от десятых долей сантиметров (надежнее — от первых сантиметров). Представляется, что дальнейшее развитие этого направления не только непосредственно в слежении за меняющимся рельефом земной поверхности практически в реальном времени, но и — при наборе репрезентативных массивов данных как в пространстве, так и во времени — валидация

теоретических численных моделей динамической геоморфологии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по гранту Российского научного фонда (проект № 19-77-10036).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wright T.J., Parsons B.E., and Lu Z.* Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. No. 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.1029/2003GL018827>
2. *Lohman R.B. and Simons M.* Some thoughts on the use of InSAR data to constrain models of surface deformation: Noise structure and data downsampling // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2005. Vol. 6. No. 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1029/2004GC000841>
3. *Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М.* Спутниковый мониторинг Земли: радиолокационное зондирование поверхности. М.: КРАСАНД, 2012. 248 с.
4. *Bonforte A., Ferretti A., Prati C., Puglisi G., and Rocca F.* Calibration of atmospheric effects on SAR interferograms by GPS and local atmosphere models: First results // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2001. No. 63. P. 1343–1357. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00252-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00252-2)
5. *Chaabane F., Avallone A., Tupin F., Briole P., and Maître H.* A Multitemporal Method for Correction of Tropospheric Effects in Differential SAR Interferometry: Application to the Gulf of Corinth Earthquake // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 45. No. 6. P. 1605–1615. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.894026>
6. *Li Z., Muller J.P., Paul C., and Fielding E.J.* Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. No. B03410. <https://doi.org/10.1029/2004JB003446>
7. *Onn F. and Zebker H.A.* Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GPS network // *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 111. No. B09102. <https://doi.org/10.1029/2005JB004012>
8. *Remy D., Bonvalot S., Briole P., and Murakami M.* Accurate measurements of tropospheric effects in volcanic areas from SAR interferometry data: application to Sakurajima volcano (Japan) // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. Vol. 213. P. 299–310. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00331-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00331-5)
9. *Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Петрова Е.Н.* ГИС-технология анализа геодинамических процессов // *Геоморфологи. Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле*. Вып. 6. М.: Медиа-Пресс, 2014. С. 53–64.
10. *Casu F., Manconi A., Pepe A., and Lanari R.* Deformation Time-Series Generation in Areas Characterized by Large Displacement Dynamics: The SAR Amplitude Pixel-Offset SBAS Technique // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011. Vol. 49. No. 7. P. 195–210. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2104325>
11. *Hooper A., Zebker H., Segall P., and Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. No. L23611. P. 1–5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
12. *Hooper A., Prata F., and Sigmundsson F.* Remote Sensing of Volcanic Harards and Their Precursors // *Proceeding of the IEEE*. 2012. Vol. 100. No. 10. P. 2908–2930. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2199269>
13. *Lanari R., Oscar M., Manunta M., Mallorquí J.J., Berardino P., and Sansosti E.* A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004. Vol. 42. No. 7. P. 1377–1386. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.828196>
14. *Peltier A., Bianchi M., Kaminski E., Komorowski J.C., Rucci A., and Staudacher T.* PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37. No. 12. P. 1–5. <https://doi.org/10.1029/2010GL043846>
15. *Pinel V., Poland M.P., and Hooper A.* Volcanology: Lessons learned from Synthetic Aperture Radar imagery // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2014. Vol. 289. P. 81–113. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.10.010>
16. *Tizzani P., Berardino P., Casu F., Euillades P., Manzo M., Ricciardi G.P., Zeni G., and Lanari R.* Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach // *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 108. P. 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.015>
17. *Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Marks F., and Moretti S.* Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project // *Engineering geology*. 2006. Vol. 88. No. 3–4. P. 200–217. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.007>
18. *Bovenga F., Pasquariello G., Pellicani R., Refice A., and Spilotro G.* Landslide monitoring for risk mitigation by using corner reflector and satellite SAR interferometry: The large landslide of Carlantino (Italy) // *Catena*. 2017. Vol. 151. P. 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.006>
19. *Феокистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А.* Перспективы разработки комплекса интерферометрической и дифференциально-интерферометрической обработки данных российских космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // *Современные проблемы дистанционного*

- зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 310–317.
20. Ferretti A., Prati C., and Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. No. 5. P. 2202–2212.
<https://doi.org/10.1109/36.868878>
 21. Pepe A. and Calò F. A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements // Applied Sciences. 2017. Vol. 7. No. 12. P. 1264.
<https://doi.org/10.3390/app7121264>
 22. Балдина Е.А., Михайлюкова П.Г., Трошко К.А. Опыт использования данных радиолокационной космической съемки для создания тематических карт // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2019. № 4. С. 110–118.
 23. ESA InSAR S1 EW [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf (дата обращения: 20.01.2021).
 24. Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Никифоров С.Э. Применение метода радиолокационной интерферометрии при маркшейдерском контроле смещений земной поверхности, вызванных разработкой месторождений нефти и газа // Изв. ВУЗов. Горный журнал. 2008. № 2. С. 45–53.
 25. Берман Л.Б., Захаров А.И. Вклад космической радиолокационной интерферометрии в изучение резервуаров крупных газовых месторождений Ямала: на примере Ямбургского месторождения // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2011. № 8. С. 57–70.
 26. Евтюшкин А.В., Филатов А.В. Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом PCA интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 46–53.
 27. Филатов А.В., Евтюшкин А.В., Васильев Ю.В. Определение смещений техногенных объектов на территории нефтяных месторождений методом радарной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 157–165.
 28. Филатов А.В., Евтюшкин А.В., Васильев Ю.В. Многолетний геодинамический мониторинг нефтегазовых месторождений Западной Сибири методом спутниковой радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 39–47.
 29. Wasowski J., Bovenga F., Nutricato R., Nitti D.O., and Chiaradia M.T. Advanced satellite radar interferometry for deformation monitoring and infrastructure control in open-cast mines and oil/gas fields // Innovative Infrastructure Solutions. 2018. Vol. 3. No. 1. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1007/s41062-018-0176-x>
 30. Михайлюкова П.Г., Тутубалина О.В. Картографирование вулканических извержений на основе радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 153–163.
 31. Anantrasirichai N., Biggs J., Albino F., Hill P., and Bull D. Application of machine learning to classification of volcanic deformation in routinely generated InSAR data // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. Vol. 123. No. 8. P. 6592–6606.
<https://doi.org/10.1029/2018JB015911>
 32. Moran S., Kwoun O., Masterlark T., and Lu Z. On the absence of deformation signals from InSAR interferograms bracketing the 1995–1996 and 1999 eruptions of Shishaldin Volcano, Alaska // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. Vol. 150. P. 119–131.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.07.013>
 33. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров 1-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурей // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 3–14.
 34. Dong J., Liao M., Xu Q., Zhang L., Tang M., and Gong J. Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River Basin // Engineering Geology. 2018. Vol. 240. P. 95–109.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818464-6.00006-8>
 35. Strozzi T., Klimesš J., Frey H., Caduff R., Huggel C., Wegmüller U., and Rapre A.C. Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: A case study from the Cordilleras of Peru // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 217. P. 111–125.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.014>
 36. Di Martire D., Tessitore S., Brancato D., Ciminelli M.G., Costabile S., Costantini M., Graziano G.V., Minati F., Ramondini M., and Calcaterra D. Landslide detection integrated system (LaDIS) based on in-situ and satellite SAR interferometry measurements // Catena. 2016. Vol. 137. P. 406–421.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.002>
 37. Qu T., Xu Q., Shan W., Li Z., Shan M., and Dai K. Deformation monitoring of high-latitude permafrost region of northeastern China with time series inSAR technique // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. 2019. Vol. 42. No. 2/W13. P. 1777–1780.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1777-2019>
 38. Liu L., Zhang T., and Wahr J. InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the North Slope of Alaska // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2010. Vol. 115. No. F03023. P. 1–14.
<https://doi.org/10.1029/2009JF001547>
 39. Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Татков Г.И., Хаптанов В.Б., Дмитриев А.В., Будаев Р.Ц., Цыбе-нов Ю.Б. Исследование криогенных деформаций

- грунта в дельте реки Селенга с помощью спутниковой РСА-интерферометрии и наземного георадарного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2011. № 5. С. 58–63.
40. Ofeigsson B.G., Hooper A., Sigmundsson F., Sturkell E., and Grapenthin R. Deep magma storage at Hekla volcano, Iceland, revealed by InSAR time series analysis // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2011. Vol. 116 No. B05401. <https://doi.org/10.1029/2010JB007576>
 41. Fujiwara S., Yurai H., Kobayashi T., Morishita Y., Nakano T., Miyahara B., Nakai H., Miura Y., Ueshiba H., Kakiage Y., and Une H. Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry // *Earth, Planets and Space*. 2016. Vol. 68. P. 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0534-x>
 42. Fielding E.J., Sangha S.S., Bekaert D.P., Samsonov S.V., and Chang J.C. Surface deformation of North-Central Oklahoma related to the 2016 Mw 5.8 Pawnee earthquake from SAR interferometry time series // *Seismological Research Letters*. 2017. Vol. 88. No. 4. P. 971–982.
 43. Roccheggiani M., Tamburini A., Tirincanti E., and Menichetti M. Automated detection of surface ruptures associated with the 2016 Central Italy earthquake sequence by Sentinel-1 SAR interferometry data // *Proceedings of the 9th International INQUA meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology*. 2018. P. 229–232.
 44. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Arora K., Timoshkina E.P., Smirnov V.B., Chadda R., Ponomarev A.V., and Shrinagesh D. New Data on the Olyutorskii Earthquake Acquired via SAR Interferometry // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 213–220. <https://doi.org/10.1134/S0742046318030053>
 45. Fielding E.J., Liu Z., Stephenson O.L., Zhong M., Liang C., Moore A., Yun S.H., and Simons M. Surface Deformation Related to the 2019 Mw 7.1 and 6.4 Ridgecrest Earthquakes in California from GPS, SAR Interferometry, and SAR Pixel Offsets // *Seismological Research Letters*. 2020. Vol. 91. No. 4. P. 2035–2046. <https://doi.org/10.1785/0220190302>
 46. Lambiel C., Delaloye R., Strozzi T., Lugon R., and Raetzo H. ERS InSAR for assessing rock glacier activity // *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska*. 2008. Vol. 1. P. 1019–1025. <https://doi.org/10.13140/2.1.1695.1681>
 47. Liu L., Millar C.I., Westfall R.D., and Zebker H.A. Surface motion of active rock glaciers in the Sierra Nevada, California, USA: inventory and a case study using InSAR // *The Cryosphere*. 2013. Vol. 7. P. 1109–1119. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1109-2013>, 2013.

The modern state of radar interferometry using for estimation of the land surface displacements

A. L. Entin^{a, #}, P. G. Mikhailukova^a, A. I. Kedich^{a, b}, and S. V. Kharchenko^{a, b}

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

^b*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: aentin@geogr.msu.ru*

The article is devoted to radar interferometry as a tool for the work of a geomorphologist engaged in modern landform processes. Differential radar interferometry (DInSAR) is based on radar imaging of the Earth's surface from spacecraft, whose orbital trajectory is recorded with high accuracy. This makes possible, by measuring the phase difference of the reflected radio signal over the same parts of the Earth's surface at a fixed time interval, to determine the values of terrain displacements along the line of sight of the satellite sensor, vertical or horizontal lines. This method, despite the fact that it has significant limitations, allows almost real-time tracking of the terrain deformations caused by various geomorphological processes. Traditional applications of InSAR are monitoring of technogenic subsidence or bedding of soil, seismogenic and volcanogenic movements of the surface, landslides and other slope processes, relief cryogenic transformation. At the limit, this method by using radar images in the C-band (for example, the twin satellites Sentinel-1A and -1B), makes possible to distinguish sub-centimeter vertical movements. In this case, the survey frequency is 1–2 weeks, the covered areas can range from hundreds of square meters to tens of thousands of square kilometers, and the specific registered vertical velocities in various publications vary in the range from the first cm / year to 1 m / event, and sometimes more (in the case of earthquakes or landslides). As an example, the result of calculating the rates of displacements of the Earth's surface in the interfluvium of the Yenisei and Bolshaya Kheta is given — they vary over the area from about –3 to +2 cm in a period of less than 2 weeks in July–August 2019, and are associated with fluvial and thermokarst processes.

Keywords: radar interferometry, surface displacement, geomorphological processes, Sentinel-1

ACKNOWLEDGMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, No. 19-77-10036.

REFERENCES

1. Wright T. J., Parsons B. E., and Lu Z. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR.

- Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. No. 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.1029/2003GL018827>
2. Lohman R.B. and Simons M. Some thoughts on the use of InSAR data to constrain models of surface deformation: Noise structure and data downsampling. *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*. 2005. Vol. 6. No. 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1029/2004GC000841>
3. Zakharov A.I., Yakovlev O.I., and Smirnov V.M. *Sputnikovyj monitoring Zemli: radiolokacionnoe zondirovanie poverhnosti* (Satellite monitoring of the Earth: radar sensing of the surface). Moscow: KRASAND (Publ.), 2012. 248 p.
4. Bonforte A., Ferretti A., Prati C., Puglisi G., and Rocca F. Calibration of atmospheric effects on SAR interferograms by GPS and local atmosphere models: First results. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2001. No. 63. P. 1343–1357. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00252-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00252-2)
5. Chaabane F., Avallone A., Tupin F., Briole P., and Maître H. A Multitemporal Method for Correction of Tropospheric Effects in Differential SAR Interferometry: Application to the Gulf of Corinth Earthquake. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 45. No. 6. P. 1605–1615. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.894026>
6. Li Z., Muller J.P., Paul C., and Fielding E.J. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration. *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. No. B3.
7. Onn F. and Zebker H.A. Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GPS network. *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 111. No. B09102. <https://doi.org/10.1029/2005JB004012>
8. Remy D., Bonvalot S., Briole P., and Murakami M. Accurate measurements of tropospheric effects in volcanic areas from SAR interferometry data: application to Sakurajima volcano (Japan). *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. Vol. 213. P. 299–310. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00331-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00331-5)
9. Gitis V.G., Derendyayev A.B., and Petrova E.N. GIS-tekhnologiya analiza geodinamicheskikh protsessov (GIS-technology for analysis of geodynamic processes). *Geomorfologiya. Sovremennyye metody i tekhnologii tsifrovogo modelirovaniya relyefa v naukah o Zemle. Vyp. 6*. Moscow: Media-press (Publ.), 2014. P. 53–64.
10. Casu F., Manconi A., Pepe A., and Lanari R. Deformation Time-Series Generation in Areas Characterized by Large Displacement Dynamics: The SAR Amplitude Pixel-Offset SBAS Technique. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011. Vol. 49. No. 7. P. 195–210. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2104325>
11. Hooper A., Zebker H., Segall P., and Kampes B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. No. L23611. P. 1–5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
12. Hooper A., Prata F., and Sigmundsson F. Remote Sensing of Volcanic Harards and Their Precursors. *Proceeding of the IEEE*. 2012. Vol. 100. No. 10. P. 2908–2930. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2199269>
13. Lanari R., Oscar M., Manunta M., Mallorquí J.J., Berardino P., and Sansosti E. A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004. Vol. 42. No. 7. P. 1377–1386. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.828196>
14. Peltier A., Bianchi M., Kaminski E., Komorowski J.C., Rucci A., and Staudacher T. PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise. *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37. No. 12. P. 1–5. <https://doi.org/10.1029/2010GL043846>
15. Pinel V., Poland M.P., and Hooper A. Volcanology: Lessons learned from Synthetic Aperture Radar imagery. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2014. Vol. 289. P. 81–113. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.10.010>
16. Tizzani P., Berardino P., Casu F., Euillades P., Manzo M., Ricciardi G.P., Zeni G., and Lanari R. Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach. *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 108. P. 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.015>
17. Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Marks F., and Moretti S. Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering geology*. 2006. Vol. 88. No. 3–4. P. 200–217. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.007>
18. Bovenga F., Pasquariello G., Pellicani R., Refice A., and Spilotro G. Landslide monitoring for risk mitigation by using corner reflector and satellite SAR interferometry: The large landslide of Carlantino (Italy). *Catena*. 2017. Vol. 151. P. 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.006>
19. Feokistov A.A., Zakharov A.I., Denisov P.V., and Gusev M.A. INSAR and DINSAR data processing software development for Russian space SAR. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011. Vol. 8. No. 2. P. 310–317. (in Russ.)
20. Ferretti A., Prati C., and Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2000. Vol. 38. No. 5. P. 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
21. Pepe A. and Calò F. A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. No. 12. P. 1264. <https://doi.org/10.3390/app7121264>
22. Baldina E.A., Mikhaylyukova P.G., and Troshko K.A. Experience of using radar satellite imagery data to create thematic maps. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2019. No. 4. P. 110–118. (in Russ.)
23. ESA InSAR S1 EW [Electronic data]. Access way: [http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%](http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20)

- 20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutor-
al_v2.pdf (access date: 20.01.2021).
24. Baranov Yu.B., Kantemirov Yu.I., Kiselevski E.V., and Nikiforov S.E. Application of the radar interferometry in the mine survey control of the surface deformations caused by the development of oil and gas fields. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*. 2008. No. 2. P. 42–43. (in Russ.)
 25. Berman L.B. and Zakharov A.I. Contribution of Space Radar Interferometry into Study of Yamal's Large Gas Fields Reservoirs. Case Study: Yamburg Field. *Zemlja iz kosmosa: naibolee jeffektivnye reshenija*. 2011. No. 8. P. 57–70. (in Russ.)
 26. Yevtyushkin A.V. and Filatov A.V. Estimation of Earth surface displacements in area of intensive oil production in Western Siberia by SAR interferometry using ENVISAT\ASAR and ALOS\PALSAR data. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2009. Vol. 6. No. 2. P. 46–53. (in Russ.)
 27. Filatov A.V., Yevtyushkin A.V., and Vasiliev Yu.V. Detection of deformations of industrial objects on territory of oil deposits by radar interferometry. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2011. Vol. 8. No. 2. P. 157–165. (in Russ.)
 28. Filatov A.V., Yevtyushkin A.V., and Vasiliev Yu.V. Long-term geodynamic monitoring of oil and gas fields in Western Siberia by InSar technique. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2012. Vol. 9. No. 2. P. 39–47. (in Russ.)
 29. Wasowski J., Bovenga F., Nutricato R., Nitti D.O., and Chiaradia M.T. Advanced satellite radar interferometry for deformation monitoring and infrastructure control in open-cast mines and oil/gas fields. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2018. Vol. 3. No. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0176-x>
 30. Mikhaylyukova P.G. and Tutubalina O.V. Mapping of volcanic eruption based on InSAR. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2016. Vol. 13. No. 2. P. 153–163. (in Russ.)
 31. Anantrasirichai N., Biggs J., Albino F., Hill P., and Bull D. Application of machine learning to classification of volcanic deformation in routinely generated InSAR data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. Vol. 123. No. 8. P. 6592–6606. <https://doi.org/10.1029/2018JB015911>
 32. Moran S., Kwoun O., Masterlark T., and Lu Z. On the absence of deformation signals from InSAR interferograms bracketing the 1995–1996 and 1999 eruptions of Shishaldin Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2006. Vol. 150. P. 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.07.013>
 33. Bondur V.G., Zakharova L.N., Zakharov A.I., Chimitdorzhiyev T.N., Dmitriev A.V., and Dagurov P.N. Monitoring of Landslide Processes by Means of L-Band Radar Interferometric Observations: Bureya River Bank Caving Case. *Issledovanie zemli iz kosmosa*. 2019. No. 5. P. 3–14. (in Russ.)
 34. Dong J., Liao M., Xu Q., Zhang L., Tang M., and Gong J. Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River Basin. *Engineering Geology*. 2018. Vol. 240. P. 95–109. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818464-6.00006-8>
 35. Strozzi T., Klimeš J., Frey H., Caduff R., Huggel C., Wegmüller U., and Rapre A.C. Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: A case study from the Cordilleras of Peru. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.014>
 36. Di Martire D., Tessitore S., Brancato D., Ciminelli M.G., Costabile S., Costantini M., Graziano G.V., Minati F., Ramondini M., and Calcaterra D. Landslide detection integrated system (LaDIS) based on in-situ and satellite SAR interferometry measurements. *Catena*. 2016. Vol. 137. P. 406–421. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.002>
 37. Qu T., Xu Q., Shan W., Li Z., Shan M., and Dai K. Deformation monitoring of high-latitude permafrost region of northeastern China with time series inSAR technique. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*. 2019. Vol. 42. No. 2/W13. P. 1777–1780. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1777-2019>
 38. Liu L., Zhang T., and Wahr J. InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the North Slope of Alaska. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2010. Vol. 115. No. F03023. P. 1–14. <https://doi.org/10.1029/2009JF001547>
 39. Chymitdorzhiev T.N., Zakharov A.I., Tatkov G.I., Haptanov V.B., Dmitriev A.V., Budaev R.C., and Cybenov J.B. Study of Soils Cryogenic Deformation in Selenga River Delta by Means of SAR Interferometry and Georadar Sounding. *Issledovanie zemli iz kosmosa*. 2011. No. 5. P. 58–63. (in Russ.)
 40. Ofeigsson B.G., Hooper A., Sigmundsson F., Sturkell E., and Grapenthin R. Deep magma storage at Hekla volcano, Iceland, revealed by InSAR time series analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2011. Vol. 116. No. B5. <https://doi.org/10.1029/2010JB007576>
 41. Fujiwara S., Yarai H., Kobayashi T., Morishita Y., Nakano T., Miyahara B., Nakai H., Miura Y., Ueshiba H., Kakiage Y., and Une H. Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry. *Earth, Planets and Space*. 2016. Vol. 68. P. 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0534-x>
 42. Fielding E.J., Sangha S.S., Bekaert D.P., Samsonov S.V., and Chang J.C. Surface deformation of North-Central Oklahoma related to the 2016 Mw 5.8 Pawnee earthquake from SAR interferometry time series. *Seismological Research Letters*. 2017. Vol. 88. No. 4. P. 971–982.
 43. Roccheggiani M., Tamburini A., Tirincanti E., and Menichetti M. Automated detection of surface ruptures associated with the 2016 Central Italy earthquake sequence by Sentinel-1 SAR interferometry data. *Proceedings of the 9th International INQUA meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology*. 2018. P. 229–232.

44. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Arora K., Timoshkina E.P., Smirnov V.B., Chadda R., Ponomarev A.V., and Shrinagesh D. New Data on the Olyutorskii Earthquake Acquired via SAR Interferometry. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 213–220. <https://doi.org/10.1134/S0742046318030053>
45. Fielding E.J., Liu Z., Stephenson O.L., Zhong M., Liang C., Moore A., Yun S.H., and Simons M. Surface Deformation Related to the 2019 Mw 7.1 and 6.4 Ridgecrest Earthquakes in California from GPS, SAR Interferometry, and SAR Pixel Offsets. *Seismological Research Letters*. 2020. Vol. 91. No. 4. P. 2035–2046. <https://doi.org/10.1785/0220190302>
46. Lambiel C., Delaloye R., Strozzi T., Lugon R., and Raetzo H. ERS InSAR for assessing rock glacier activity. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska*. 2008. Vol. 1. P. 1019–1025. <https://doi.org/10.13140/2.1.1695.1681>
47. Liu L., Millar C.I., Westfall R.D., and Zebker H.A. Surface motion of active rock glaciers in the Sierra Nevada, California, USA: inventory and a case study using InSAR. *The Cryosphere*. 2013. Vol. 7. No. 4. P. 1109–1119. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1109-2013>, 2013