

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**МЕТОДЫ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ОБРАБОТКИ
ОПТИЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ
(НА ПРИМЕРЕ БАЙКАЛЬСКОГО ЦБК)**

© 2021 г. В. Г. Бондур^{a, *}, Т. Н. Чимитдоржиев^{a, b}, А. В. Дмитриев^b, П. Н. Дагуров^b

^aНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

^bИнститут физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 16.02.2021 г.

Приведены результаты исследования состояния территории и районов размещения хранилищ отходов Байкальского ЦБК с использованием радарных и оптических спутниковых данных. С применением метода дифференциальной радарной интерферометрии к спутниковым данным радара L-диапазона ALOS-2 PALSAR-2 продемонстрирована возможность анализа деформаций земной поверхности в районе хранилищ отходов. На основании применения метода мультитременных интерферометрических измерений SBAS к данным спутникового радара C-диапазона Sentinel-1B выявлено наличие на исследуемой территории двух блоков, из которых один испытывает поднятие, а другой опускание. Разность деформаций за период с 2017 по 2020 гг. достигла 17–19 мм. Установлена существенная корреляция в определении обводненности отходов между радарными измерениями интенсивности обратного рассеяния (спутник Sentinel-1B) и оптическими данными (спутники Sentinel-2A/B), использующими водный индекс NDWI.

Ключевые слова: метод радарной интерферометрии, спутниковые данные

DOI: 10.31857/S020596142105002X

ВВЕДЕНИЕ

Природные катастрофы и техногенные аварии оказывают значительное негативное воздействие на жизнедеятельность человека и окружающую среду. Для предупреждения и снижения последствий опасных процессов и явлений эффективно использование методов дистанционного зондирования из космоса. Спутниковые данные используются, например, для мониторинга тайфунов (Бондур и др., 2008), оползневых процессов (Бондур и др., 2019), выявления предвестников землетрясений путем регистрации изменений систем линеаментов (Бондур, Зверев, 2005; Бондур В.Г., Гапонова Е.В., 2021), выявления аномалий ионосферных параметров по сигналам спутниковых навигационных систем (Бондур, Смирнов, 2005; Бондур и др., 2007), анализа динамики блоково-разломных структур методами спутниковой радиоинтерферометрии (Бондур и др., 2021) и др. При этом эффективность спутниковых методов для мониторинга сейсмоопасных территорий повышается при их комплексировании с методами, основанными на применении геомеханических моделей (Бондур и др., 2010, 2016) или

методов сейсмической энтропии (Акопян и др., 2017).

Спутниковые изображения необходимы, как источники оперативных данных для предупреждения, оценки и смягчения последствий опасных процессов. Космические оптические изображения обеспечивают получение высокого пространственного разрешения и визуальную наглядность при мониторинге изменений земного покрова. Другим эффективным методом для решения задач мониторинга опасных процессов являются спутниковые радиолокационные методы (Бондур и др., 2019, 2021; Chimitdorzhiev et al., 2016; Dagurov et al., 2020; Ge et al., 2020; Tay et al., 2020). Вследствие своей независимости от погоды и освещенности земной поверхности они в ряде случаев являются незаменимым способом дистанционного зондирования.

Следует отметить, что опасные природные явления, такие, например, как землетрясения, наводнения, оползни, сели и др., могут являться причиной техногенных аварий. Особую опасность для окружающей среды представляют крупные промышленные предприятия с резервуарами-хранилищами топлива или токсичных от-

ходов, которые расположены в сейсмически активных областях. Однако число исследований, результаты которых предупреждают о возможности экологических аварий на крупных объектах инфраструктуры и предназначены для мониторинга состояния и негативных изменений объектов с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций (D'Aranno et al., 2021; Liu et al., 2015; Milillo et al., 2018; Sousa et al., 2013), до сих пор невелико.

В настоящей работе исследуется возможность спутникового мониторинга состояния поверхности промышленной площадки и промышленных отходов, накопленных за время работы Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) (Иркутская область, Россия) с помощью использования радарных и оптических данных. Для этого были использованы методы радарной интерферометрии и метод совместного анализа амплитудных изображений в радио и оптическом диапазонах с помощью сервиса Google Earth Engine.

Целью работы является разработка технологии анализа состояния и деформаций поверхности в месте расположения распределенной инфраструктуры крупного промышленного объекта, который является потенциальным источником негативных изменений окружающей среды, на основе совместного применения методов радиолокационной интерферометрии и результатов анализа больших объемов оптико-микроволновых данных на облачной платформе Google Earth Engine. Исследование выполнено на примере БЦБК, который выбран в качестве объекта исследования, поскольку он находится в сейсмически опасной области, а отходы, накопленные за период деятельности комбината, представляют потенциальный источник негативных изменений окружающей среды и несут угрозу оз. Байкал – участку Всемирного природного наследия ЮНЕСКО.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат расположен на юго-западном побережье оз. Байкал. Он был введен в эксплуатацию в 1966 г. и прекратил свою деятельность в 2013 г. В так называемых картах-накопителях БЦБК, расположенных на берегу озера, за годы работы комбината накопилось порядка 6,5 млн т твердых и жидких отходов. Основной объем составляет шлам-лигнин. Отходы расположены в 14 картах-накопителях Солзанского и Бабхинского полигонов, общей площадью 180 га, а также в 6 бассейнах-отстойниках очистных сооружений. Карта-схема исследуемой территории показана на рис. 1 (<https://docplayer.ru/43237855-Sostav-proekta-tomanaimenovanie-ispolnitel-1-razdel-ocenka-vozdeystviya-na-okruzhayushchuyu-sredu-ooo-pela.html>). Отходы, хранящиеся в картах-накопителях, имеют

различный морфологический и физико-химический состав. Формирование и анализ состава отходов в картах-накопителях и предлагаемые мероприятия по утилизации отходов приведены в работах (Богданов и др., 2017; Лапердин, 2018; Объект, 2021; Чебыкин и др., 2018). Хранилища отходов представляют большую потенциальную опасность для оз. Байкал. В работе (Лапердин, 2018) на основе многолетних наблюдений и полевых исследований указывается на возможность развития катастрофы. Угроза катастрофического загрязнения Байкала может возникнуть в случаях переполнения карт-накопителей отходов БЦБК в результате наводнений и селей и опускания Утуликско-Солзанской депрессии и погружения высокотоксичного материала в озеро при сильном землетрясении. Вероятность землетрясений обусловлена расположением рассматриваемой территории в сейсмически активной области (Бондур В.Г., Гапонова Е.В., 2021; Бондур и др., 2021).

Для обработки и анализа использовались радарные и оптические спутниковые изображения. Радарные изображения были получены в L- и C-диапазонах. В L-диапазоне использовались данные, полученные радаром ALOS PALSAR, а в C-диапазоне радаром Sentinel-1B. Радарные амплитудные (некогерентные) данные Sentinel-1B в C-диапазоне и оптические данные сенсора Sentinel-2 были получены на платформе облачных вычислений Google Earth Engine. Данный сервис в последние годы получает широкое распространение в практике исследований по дистанционному зондированию (Amani et al., 2020; DeVriesa et al., 2020; Gorelick et al., 2017), обеспечивая обработку больших объемов данных.

Интерферометрическая обработка радарных когерентных данных ALOS PALSAR и Sentinel-1B проводилась с помощью программного пакета SARscape.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДАМИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Выбор метода проведения исследований

Спутниковая радарная интерферометрия (InSAR) является эффективным методом дистанционного зондирования, позволяющим определять деформации объектов и выявлять подвижки земной поверхности с субсантиметровой точностью. Радиointерферометрия используется для оценки космических подвижек геологических структур (Бондур и др., 2019, 2021; Grandin et al., 2017; Huang et al., 2019; Ji et al., 2020), деформаций территорий в районах интенсивной подземной добычи полезных ископаемых и водных ресурсов (Cigna, Tapete, 2021; Pawluszek-Filipiak et al., 2020),

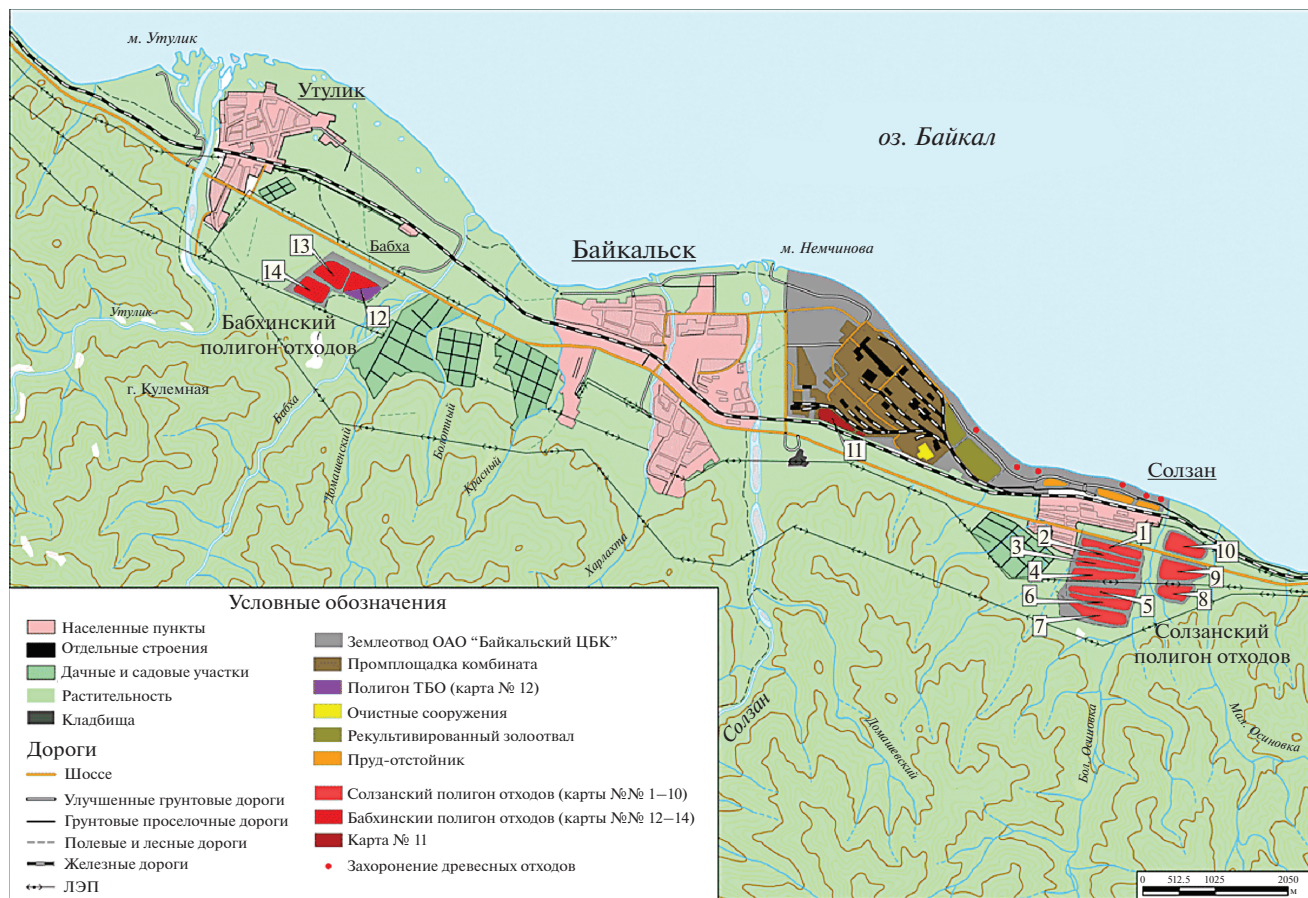


Рис. 1. Схема размещения отходов производства Байкальского ЦБК.

сезонной динамики обводненных грунтов (Chimtdorzhev et al., 2016), оценки водного эквивалента снега (Dagurov et al., 2020) и т.д.

Мониторинг деформаций земной поверхности методами радарной интерферометрии предполагает регулярную съемку объектов исследования, которая в настоящее время для большей части территории России может быть реализована с использованием данных, полученных с помощью радара С-диапазона (длина волны 5.6 см) спутников Sentinel-1A/B.

При этом следует отметить, что в областях с лесным покровом когерентность мала и это затрудняет получение непрерывных площадных интерферограмм (Бондур и др., 2021). Несколько лучших интерферометрическую временную когерентность позволяют получить радиолокационные данные спутников ALOS-1/2 PALSAR-1/2 (L-диапазон, длина волны 23.5 см). Большая проникающая способность радиолокационного эхосигнала L-диапазона под лесной полог позволяет выполнить оценки смещений для лесистой местности (Бондур и др., 2021).

Классическая дифференциальная радарная интерферометрия (ДРИ – DInSAR) основана на измерениях разности расстояний от спутника до земной поверхности с близких точек двух орбит последовательных пролетов спутникового радара (Gabriel et al., 1989). Основное ограничение метода DInSAR – отсутствие когерентности радиолокационных эхо-сигналов, полученных при зондировании со значительно разнесенных орбит (пространственная декорреляция), или в случае значительных изменений за время между съемками (временная декорреляция).

Развитием метода DInSAR являются метод постоянных рассеивателей (Ferretti et al., 2001) и метод малых базовых линий (Berardino et al., 2002), именуемые в зарубежной литературе MT-InSAR (от англ. Multi Time), основанные на анализе многовременных последовательных серий изображений. Метод постоянных рассеивателей (англ. Persistent Scatterers, PS) позволяет рассчитать поведение во времени точечных постоянных рассеивателей с достаточно сильным и устойчивым во времени отраженным сигналом. Для этих дискретных рассеивателей рассчитывается множество интерферометрических фазовых соотношений отно-

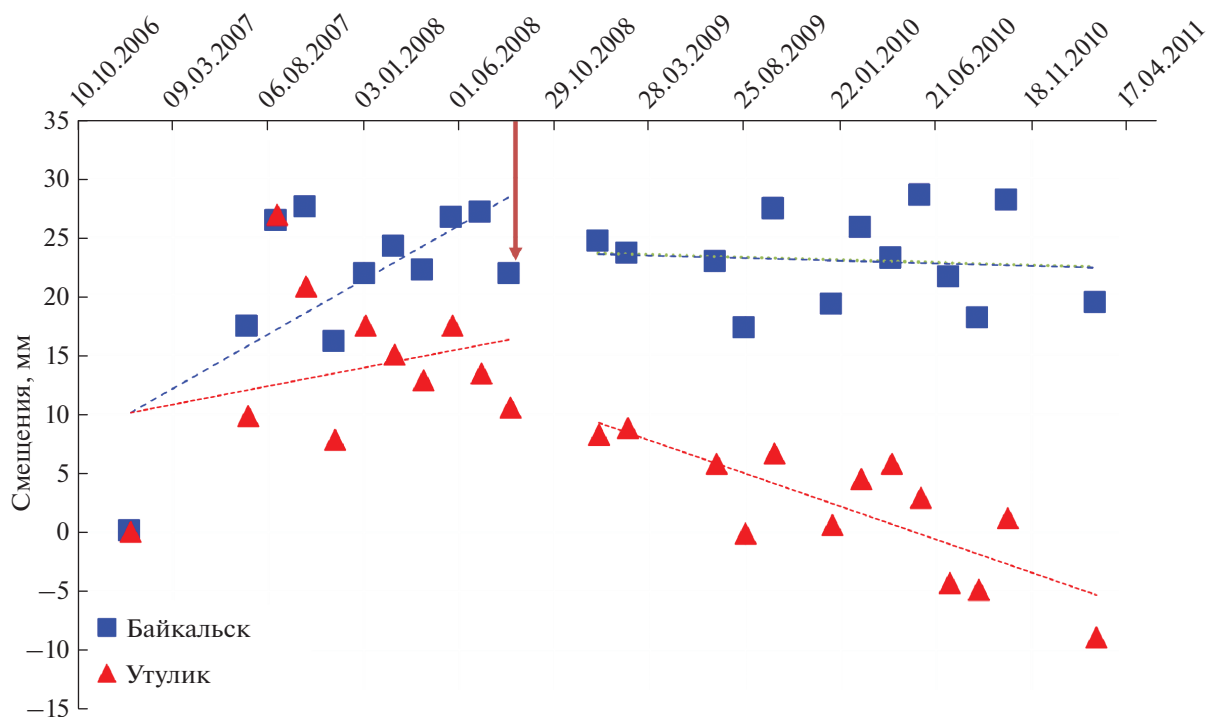


Рис. 2. Динамика блоков в 2006–2011 гг.

сительно одного опорного изображения, которые позволяют оценить величину и скорость деформаций на определенных временных отрезках. Подход на основе малых базовых линий (англ. Small Baseline Subset, SBAS) предполагает использование серий данных с малыми пространственными интерферометрическими (менее порогового значения) базовыми линиями, в моменты съемки, и малыми временными промежутками между съемками. Динамика процесса для протяженных объектов (множества элементов разрешения) может оцениваться с минимальной декорреляцией.

Использование временных серий радарных данных для создания множества последовательных фазовых соотношений позволяет более точно (по сравнению с DInSAR) оценить величину деформаций, дискретно расположенных постоянных рассеивателей (в случае PS) или небольших площадных структур (SBAS). Обработка и анализ десятков интерферограмм позволяет существенно уменьшить влияние атмосферы, неточностей опорной цифровой модели рельефа (ЦМР) и орбитальных ошибок.

*Результаты исследований
радиоинтерферометрическими методами
и их анализ*

В работе (Бондур и др., 2021) с использованием радиоинтерферометрического метода на основе

данных спутникового радара ALOS PALSAR, систематизированных за период времени 2006–2011 гг., были измерены сдвиги земной поверхности в районе БЦБК (см. рис. 2) до и после наиболее сильного за современную историю наблюдений в этом районе Култукского землетрясения, состоявшегося 27 августа 2008 г. (магнитуда $M = 6.3$). В прибрежной части оз. Байкал были выявлены подвижные блоки — две своеобразные террасы в районе п. Утулик и г. Байкальск с промозной БЦБК, граница между которыми проходит восточнее Бабхинского полигона по р. Бабха (см. рис. 1).

Как видно из рис. 2, перед рассматриваемым Култукским сейсмическим событием с магнитудой $M = 6.3$ (обозначено стрелкой) наблюдался общий подъем блоков с разной скоростью. При этом различие величин деформаций перед землетрясением достигало примерно 12 мм. После Култукского землетрясения наблюдалась относительная стабильность блока “Байкальск” и опускание блока “Утулик”.

Рассмотрим динамику выявленных блоков за период времени с 2017 по 2020 гг. по результатам применения методов MT-InSAR в С-диапазоне и DInSAR в L-диапазоне. Анализ, проведенный с помощью метода PS интерферометрии показал недостаточную для корректной обработки плотность постоянных рассеивателей. Применение метода SBAS интерферометрии дало возможность выполнить анализ распределенных рассеи-

Таблица 1. Анализ интерферограмм, полученных из интерферометрических пар

Изображение 1	Изображение 2	Пространственная база, В (м)	Временная база, сутки
03.10.2015 г.	01.10.2016 г.	101	364
01.10.2016 г.	30.09.2017 г.	48	364
30.09.2017 г.	01.09.2018 г.	135	336
01.09.2018 г.	20.07.2019 г.	247	322
20.07.2019 г.	12.09.2020 г.	59	420

вателей. Для исключения влияния сезонных деформаций мерзло-талых почв (Chimitdorzhiev, 2016) и влияния снежного покрова (Dagurov et al., 2020) на интерферометрическую фазу были использованы радиолокационные данные Sentinel-1В для бесснежных сезонов за период 11.06.2017 по 29.10.2020 гг. (всего 42 изображения на согласованной вертикальной поляризации). В качестве опорной цифровой модели рельефа (ЦМР) исследуемой территории для расчета методом SBAS интерферометрии использовалась ЦМР, построенная по данным спутникового радара TerraSAR-X/TanDEM-X за 28 октября 2016 г.

Результаты обработки данных Sentinel-1В методом SBAS интерферометрии, приведенные на рис. 3, демонстрируют наличие блоковой структуры на исследуемой территории. На рис. 3 показано расположение кластеров SBAS (а) и представлен временной ход деформаций земной поверхности в районе населенных пунктов Байкальск и Утулик и в районе Солзанского полигона отходов производства БЦБК (б). Из анализа приведенных временных серий усредненных деформаций блоков следует, что условный блок “Байкальск–Утулик” опускается относительно положения 11 июня 2017 г., а условный блок “Солзанский полигон” поднимается. При этом различие между значениями подвижек блоков в октябре 2020 г. составило около 20 мм.

Указанная величина смещений превышает значение 12 мм (см. рис. 2), после которого произошло сейсмособытие в 2008 г. Однако эта величина была измерена на двухлетнем интервале (2006–2008 гг.), в то время как на рис. 3 представлены результаты за трехлетний период. В целом, можно предположить, что происходит возрастание напряженного состояния блоковой структуры в непосредственной близости к хранилищу токсичных отходов.

Применение методов MT-InSAR к временным рядам данных Sentinel-1В для анализа деформаций поверхностей карт-накопителей показало, что на этих поверхностях отсутствуют точечные и

распределенные когерентные рассеиватели, необходимые для использования методов PS и SBAS. Поэтому для анализа был использован метод DInSAR для радарных изображений, полученных с борта спутников ALOS-2 PALSAR-2 на согласованной горизонтальной поляризации (передача и прием на горизонтальной поляризации) с малыми пространственными базами. В табл. 1 приведены использованные интерферометрические пары.

На рис. 4 для примера представлены интерферограммы – изображения интерферометрической фазы земной поверхности в районе г. Байкальск с цветовой шкалой в радианах; синим цветом показаны реки и оз. Байкал, красной стрелкой указано местоположение Бабхинского полигона, синей стрелкой – Солзанского полигона.

При анализе подвижек поверхности особый интерес представляют сдвиги фаз относительно первой даты съемки в районе карт-накопителей. Уменьшение интерферометрической фазы свидетельствует об уменьшении расстояния от точки измерения до радара, т.е. поверхность поднимается и, наоборот, увеличение фазы соответствует опусканию поверхности. Неоднозначность 2π для оценки деформаций соответствует величине 12 см.

Анализ интерферограмм, полученных из интерферометрических пар (табл. 1), показывает, что поверхность карт-накопителей 12 Бабхинского полигона опустилась за период 30.09.2017–01.09.2018 гг. на 5 см. За период с 20.07.2019 по 12.09.2020 гг. отмечено поднятие на 3 см, а за двухлетний период 01.09.2018–12.09.2020 гг. наблюдается поднятие примерно на 4 см. Таким образом, суммарная деформация поверхности Бабхинского полигона составила 1 см. Для части 2, 3, и 4-й карт-накопителей Солзанского полигона на годичном интервале (2018–2019 гг.) отмечается опускание поверхности до 7 см. Отмечена стабильность поверхности карт-накопителей № 6 и 7 на годичном интервале (с 20.07.2019 по 12.09.2020 гг. (поднятие

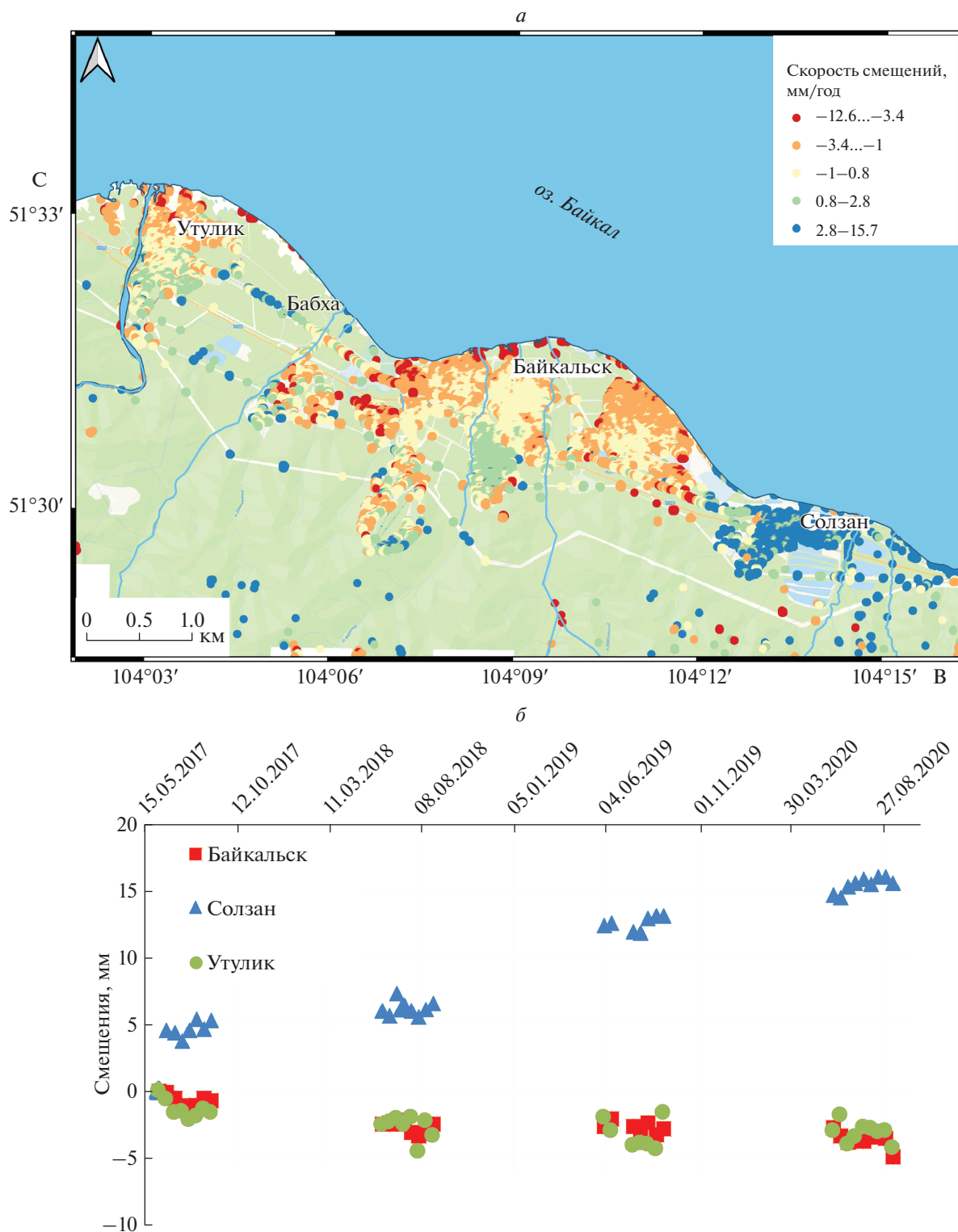


Рис. 3. Расположение кластеров SBAS (*a*) и временные серии усредненных деформаций блоков (*b*).

поверхности было менее 1 см). Однако данные карт-накопителей № 6 и 7 Солзанского полигона и участки SBAS интерферометрии в районе Сол-

зана (темно-синий цвет на рис. 3) расположены на одном блоке, поэтому следует учитывать суммарную величину.

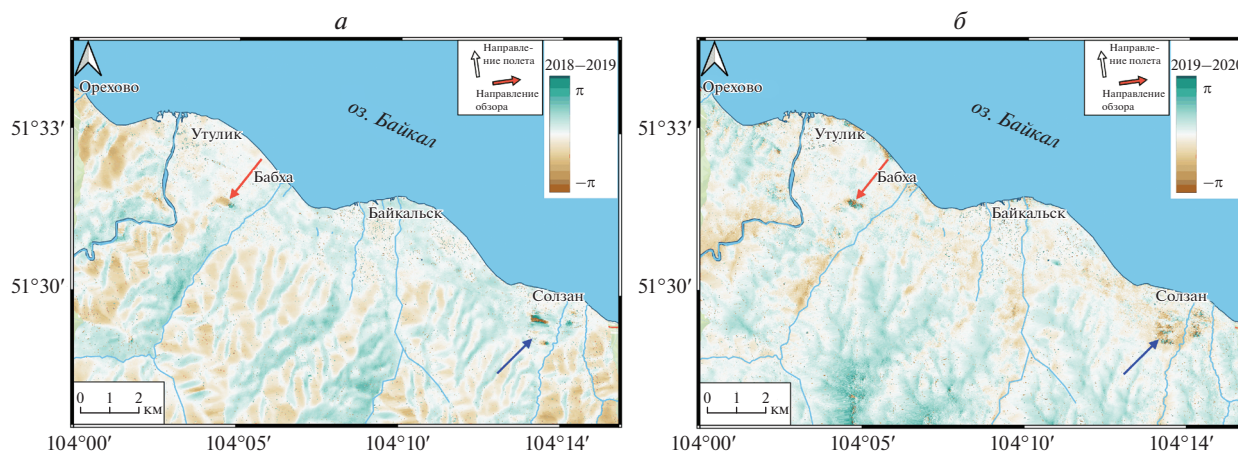


Рис. 4. Интерферограммы земной поверхности в районе г. Байкальск: *а* – интерферометрическая пара 01.09.2018–20.07.2019 гг., *б* – интерферометрическая пара 20.07.2019–12.09.2020 гг.

В целом, результаты DInSAR по данным ALOS-2 PALSAR-2 показали, что диапазон деформаций поверхности Бабхинского полигона отходов не превышает 5 см, а деформации поверхности Солзанского полигона – 7 см.

МОНИТОРИНГ КАРТ-НАКОПИТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ РАДАРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ОБЛАЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ GOOGLE EARTH ENGINE

В этом разделе приведем результаты, полученные из временных рядов усредненной интенсивности (амплитуды) обратного радарного рассеяния, на основании данных спутника Sentinel-1В. Эти результаты получены с использованием ресурсов облачной платформы Google Earth Engine. В левой части рис. 5 представлены величины суммарного обратного радиолокационного рассеяния (σ_{span}) для согласованной и кросс-поляризации, выраженной в децибелах $\sigma_{\text{span}} = 10 \lg \left(\langle |S_{VH}|^2 \rangle + \langle |S_{VV}|^2 \rangle \right)$. Данные получены усреднением временных рядов за бесснежные периоды с 2016 по 2020 гг. (с начала мая по конец октября). Всего было использовано 55 изображений Sentinel-1В.

В правой части рис. 5 приведены карты распределений усредненного водного индекса NDWI (McFeeters S.K., 1996), характеризующего наличие воды. Водный индекс NDWI был рассчитан по каналам В3 (зеленый, 559 нм) и В8А (ближний инфракрасный, 864 нм) оптических изображений, полученных с борта спутников Sentinel-2А/В для бесснежных периодов времени 2016–2020 гг. Всего было использовано 82 оптических снимка. Изображения расположены попарно по годам.

Синим цветом на радарных изображениях отображаются водные поверхности. Для удобства

цветовая палитра на изображениях NDWI выбрана так, чтобы участки, покрытые водой, имели сходные с радиолокационными оттенки цвета. Анализ рис. 5 показывает, что отмечается значительная попарная схожесть данных, полученных на основе радарных и оптических спутниковых изображений.

Для исследования состояния хранилищ отходов рассмотрим 5, 6 и 7 карты-накопители Солзанского полигона отходов (см. рис. 1), которые согласно рис. 5 характеризуются различным водным режимом. Для тестовых участков в виде окружностей радиусом 40 м (площадью 0.5 Га), указанных на рис. 6, *а* красным, зеленым и синим цветами были построены графики (рис. 6, *б*) изменения величины обратного радарного рассеяния в период времени без снежного покрова и отсутствия сезонного протаяния обводненных грунтов. Цвета на графике соответствуют цветам тестовых участков на рис. 6, *б*. Черным цветом для сравнения представлены данные для интенсивности радарного обратного рассеяния от водной поверхности оз. Байкал. Измерения выполнены на согласованной вертикальной поляризации.

Анализ результатов, приведенных на рис. 5 и на рис. 6, *б*, показывает, что тестовые участки и значительная часть 5 и 6 хранилища существенно не изменяли состояние водности. По графику можно полагать о существенной обводненности поверхности карты 7 (синий цвет), что согласуется с данными рис. 5. Для этого хранилища дополнительно выбраны другие точки, которые судя по данным рис. 5 расположены на водной и осушенной частях хранилища (соответственно фиолетовый и оранжевый цвета на рис. 6, *в*). Соответствующие временные ряды представлены на рис. 6, *г*, цвета на котором соответствуют цветам тестовых

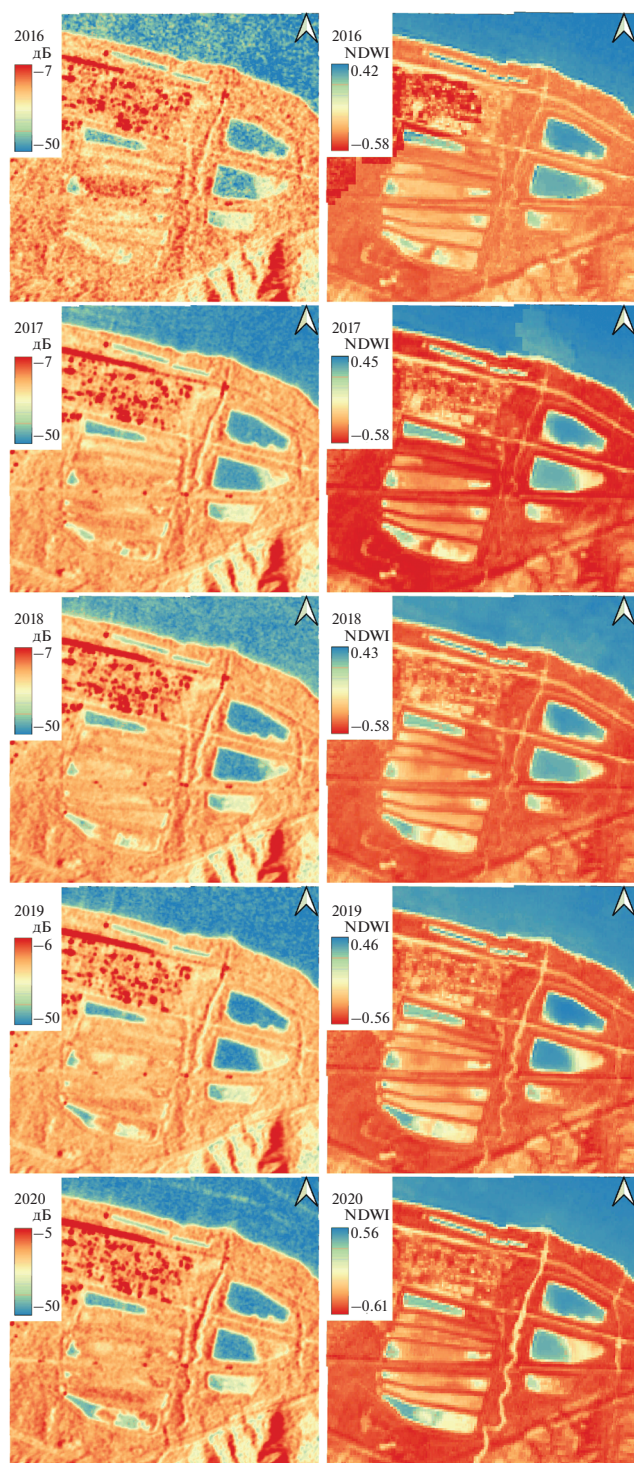


Рис. 5. Радарные изображения, полученные со спутника Sentinel-1B (слева), и карты NDWI, полученные по оптическим данным спутника Sentinel-2A/B (справа) за 2016–2020 гг.

участков на рис. 6, в. Черным цветом для сравнения показаны данные для поверхности оз. Байкал.

Анализ мультिवременных данных, полученных с использованием данных облачной плат-

формы Google Earth Engine и характеризующих состояние обводненности карт-накопителей, показывает достаточно стабильный режим обводненности на 5 и 6 картах-накопителях Солзанского полигона (см. тренды зеленого и красного цвета на рис. 6, б).

Однако на 7-м хранилище отходов БЦБК, которое расположено выше других по рельефу, отмечается увеличение обводненности (см. тренды синего цвета на рис. 6, б и фиолетового и оранжевого цвета на рис. 6, г). Последнее может быть связано с поступлением воды или жидких отходов извне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием комплексного подхода к дистанционному зондированию территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината проанализированы участки территории с хранилищами отходов на основе методов классической дифференциальной интерферометрии и мультивременных серий радарных изображений, а также радарных и оптических изображений, представленных на облачной платформе Google Earth Engine.

В результате применения интерферометрического метода SBAS и анализа временных рядов данных спутникового радара Sentinel-1B обнаружены два подвижных блока с границей между промзоной БЦБК и Солзанским полигоном отходов, причем один из блоков испытывает подъем, а другой опускается. За период с июня 2017 г. по октябрь 2020 г. разность деформаций достигла 17–19 мм, что может свидетельствовать о возрастании напряженно деформированного состояния на данном участке Байкальского рифта.

С помощью дифференциальной радарной интерферометрии DInSAR с использованием данных спутникового радара ALOS-2 PALSAR-2 выделены фрагменты осушенных (не покрытых надшламовыми водами) карт-накопителей с разнонаправленными деформациями поверхности (опускание/поднятие) в среднем порядка 2–3 см и максимальными величинами около 7 см в 2017–2020 гг. относительно окружающей территории.

В результате анализа мультивременных радарных данных Sentinel-1B и оптических данных спутника Sentinel-2, представленных на облачной платформе Google Earth Engine, выявлено увеличение поверхности, покрытой надшламовой водой, для случая 7-й карты-накопителя.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности комплексирования радарных и оптических данных для анализа состояния хранилищ отходов.

Радиолокационные данные ALOS-1/2 PALSAR-1/2 получены в рамках международного сотрудниче-

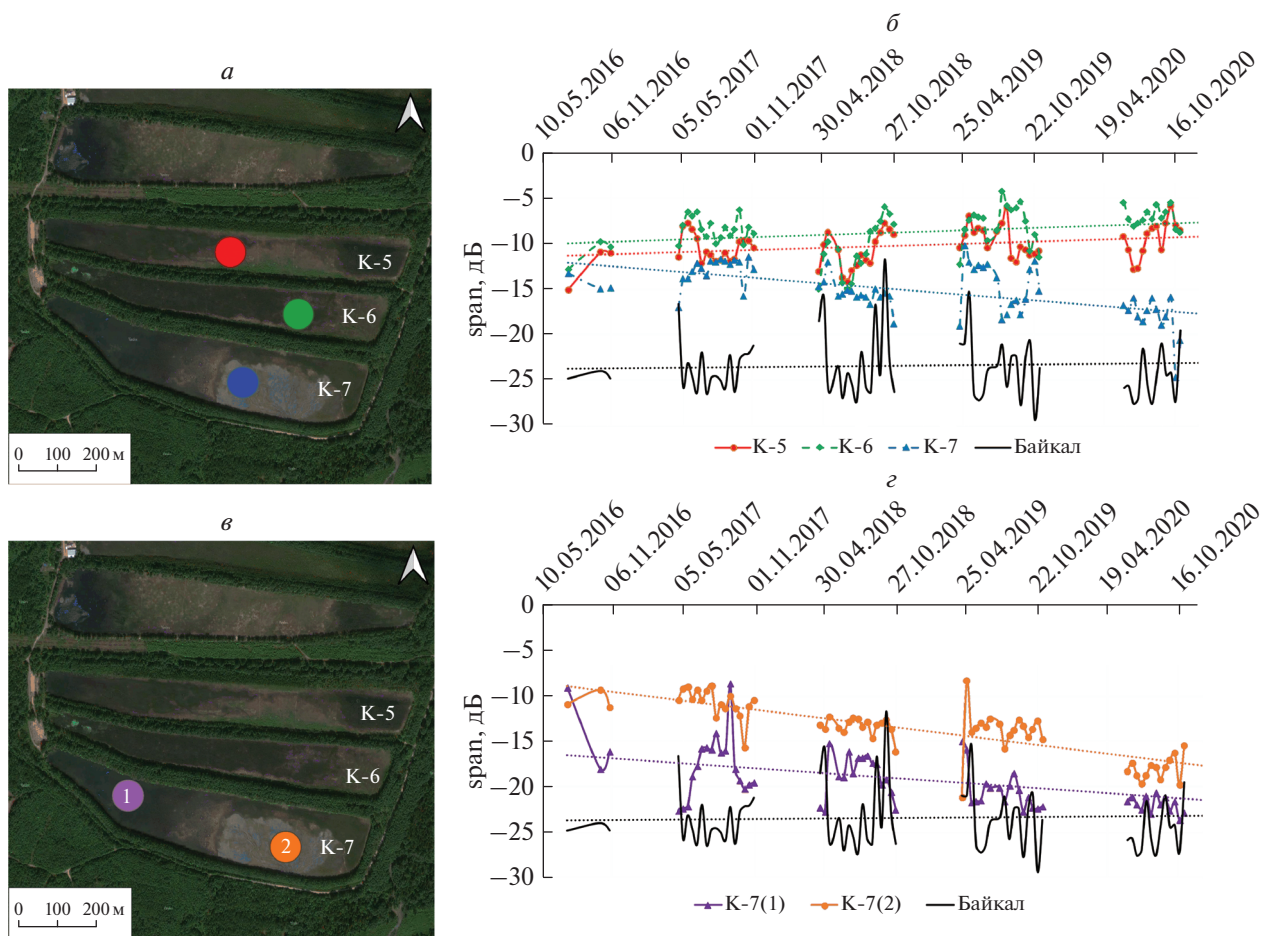


Рис. 6. Расположение тестовых участков на 5, 6 и 7 картах-накопителях отходов (а) и временные ряды коэффициента обратного радиолокационного рассеяния (б).

ства по проекту японского аэрокосмического агентства JAXA (PI 3402). Данные спутниковой радиолокационной интерферометрической системы TerraSAR-X/TanDEM-X предоставлены немецким аэрокосмическим центром DLR в рамках проекта ХТИ_HYDR0485 “The study of cryogenic processes in Siberia by interferometry TanDEM-X”.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010021>

Богданов А.В., Шатрова А.С., Качор О.Л. Разработка экологически безопасной технологии утилизации отходов ОАО “Байкальский ЦБК” / А.В. Богданов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 2. С. 47–53.

Бондур В.Г., Гапонова Е.В. Регистрация из космоса аномальных вариаций линейментных систем байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, состоявшегося 21 сентября 2020 г. // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 2. С. 3–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421020020>

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линейментов // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 3. С. 37–52.

Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмически опасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.

Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиен-

- тов атмосферного давления // Докл. АН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В.* Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В.* Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016. № 1. С. 120–132. <https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- 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 I-диапазона на примере обрушения склона берега реки Буряя // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 5. С. 3–14.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А.* О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // Докл. АН. 2008. Т. 422. № 2. С. 244–249.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н.* Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 гг. на южном Байкале методами спутниковой радиointерферометрии // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. В печати.
- Лапердин В.К.* Мероприятия по утилизации и хранению лигнин-содержащих промышленных и жидких бытовых отходов в бассейне оз. Байкал // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2018. № 3. С. 77–85. <https://doi.org/10.7868/S0869780318030092>
- Объект накопленного экологического вреда (Байкальский ЦБК), 2021 (https://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2021/04/2021_BCBK.pdf)
- Чебыкин Е.П., Дамбинов Ю.А., Сутурин А.Н.* Многоэлементный анализ надшламмовых вод карт-накопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината для выбора стратегии ремедиации территории // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 4(84). С. 67–80. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80>
- Amani M., Ghorbanian A., Ahmadi S.A., Kakooei M., Moghimi A., Mirmazloumi S.M., Moghaddam S.H.A., Mahdavi S., Ghahremanloo M., Parsian S., Wu Q., Brisco B.* Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. V. 13. P. 5326–5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N., Bykov M.E., Dmitriev A.V., Kirbizhekova I.I.* Comparison of ALOS PALSAR interferometry and field geodetic leveling for marshy soil thaw/freeze monitoring, case study from the Baikal lake region, Russia // J. Applied Remote Sensing. 2016. T. 10. № 1. С. 016006.
- Cigna F., Tapete D.* Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico // Remote Sensing of Environment. V. 254. 2021. P. 112254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112254>
- Dagurov P.N., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I.* Estimation of snow water equivalent from L-band radar interferometry: simulation and experiment // International J. Remote Sensing. 2020. V. 41. № 24. P. 9328–9359.
- D'Aranno P.J.V., Di Benedetto A., Fiani M., Marsella M., Moriero I., Palenzuela Baena J.A.* An Application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique for Infrastructure Monitoring. Remote Sens. 2021. V. 13. № 6. P. 1052. <https://doi.org/10.3390/rs13061052>
- DeVriesa B., Huang C., Armston J., Huang W., Jones J.W., Lang M.W.* Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine // Remote Sensing of Environment. 2020. 240. 111664
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. № 1. P. 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Huang Z., Zhang G., Shan X., Gong W., Zhang Y., Li Y.* Co-Seismic Deformation and Fault Slip Model of the 2017 Mw 7.3 Darbandikhan, Iran–Iraq Earthquake Inferred from D-InSAR Measurements // Remote Sens. 2019. V. 11. № 21. P. 2521. <https://doi.org/10.3390/rs11212521>
- Gabriel A., Goldstein R., Zebker H.A.* Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № B7. P. 9183–9191.
- Rosen P.A., Henseley S., Joughin I. R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.* Synthetic aperture radar interferometry // Proc. IEEE. 2000. V. 88. № 3. P. 333–382.
- Ge P., Gokonb H., Meguroc K.* A review on synthetic aperture radar-based building damage assessment in disasters // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 240. 111693. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111693>
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sens. Environ. 2017. V. 202. P. 18–27. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- Grandin R., Vallée M., Lacassin R.* Rupture Process of the Mw 5.8 Pawnee, Oklahoma, Earthquake from Sentinel-1 InSAR and Seismological Data // Seismol. Res. Lett. 2017. V. 88. № 4. P. 994–1004. <https://doi.org/10.1785/s10712-020-09586-5>
- Ji L., Zhang W., Liu C., Zhu L., Xu J., Xu X.* Characterizing interseismic deformation of the Xianshuihe fault, eastern Tibetan Plateau, using Sentinel-1 SAR images // Adv. Space Res. 2020. V. 66. № 2. P. 378–394. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.043>
- Le Cozannet G., Kervyn M., Russo S., Ifejika Speranza C., Ferrier P., Foumelis M., Lopez T., Modaresi H.* Space-Based Earth Observations for Disaster Risk Management // Surveys in Geophysics. 2020. V. 41. P. 1209–1235. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09586-5>
- Liu X., Tong X., Ding K., Zhao X., Zhu L., Zhang X.D.* Measurement of Long-Term Periodic and Dynamic Deflection of the Long-Span Railway Bridge Using Microwave Inter-

ferometry // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens. 2015. V. 8. P. 4531–4538.

McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International J. Remote Sensing. 1996. V. 17. № 7. P. 1425–1432.

Milillo P., Giardina G., DeJong M.J., Perissin D., Milillo G. Multi-Temporal InSAR Structural Damage Assessment: The London Crossrail Case Study // Remote Sens. 2018. V. 10. P. 287.

Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to determine mining-related defor-

mations using sentinel-1 data: The case study of Rydułtowy mine in Poland // Remote Sens. 2020. V. 12. № 2. P. 242. <https://doi.org/10.3390/rs12020242>

Sousa J.J., Bastos L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse // Nat. Hazard. Earth Syst. 2013. V. 13. P. 659–667.

Tay C.W.J., Sang-HoYun, Shi Tong Chin, Alok Bhardwaj, Jungkyo Jung, Hill E.M. Rapid food and damage mapping using synthetic aperture radar in response to Typhoon Hagibis, Japan // Scientific Data. 2020. 7:100. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0443-5>

The Methods of Radar Interferometry and Optical Satellite Imagery Processing to Study Negative Environmental Impacts (Baikal Pulp-And-Paper Plant Case Study)

V. G. Bondur¹, T. N. Chimitdorzhiev^{1, 2}, A. V. Dmitriev², and P. N. Dagurov²

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

²Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Here we present the results of the study of the state of the territory and the Baikal Pulp-and-Paper Plant waste deposits using radar and optical satellite data. The capability to analyze the Earth's crust deformations in the vicinity of waste deposits has been demonstrated through the application of the differential radar interferometry method to L-band ALOS-2 PALSAR-2 radar satellite data. The presence of two blocks in the study area has been revealed, one of which is experiencing an upheaval and the other a foundering, on the base of application of the SBAS multitemporal interferometric measurement method to the Sentinel-1B C-band satellite radar data. The difference between deformations over the period from 2017 to 2020 reached 17–19 mm. A notable correlation has been found in determining water cut of wastes between radar measurements of the back-scattering intensity (Sentinel-1B) and optical data (Sentinel-2A/B) using the NDWI water index.

Keywords: radar interferometry method, satellite data

REFERENCES

Akopian S.Ts., Bondur V.G., Rogozhin E.A. Technology for monitoring and forecasting strong earthquakes in Russia with the use of the seismic entropy method // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. № 1. P. 32–51. DOI: 10.1134/S10693513170100

Bogdanov A.V., Shatrova A.S., Kachor O.L. Razrabotka ekologicheskoi bezopasnoy tekhnologii utilizatsii otkhodov OAO “Baykal’skiy TSBK” (Development of an environmentally friendly waste disposal technology at the Baikal PPM) // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya. 2017. № 2. P. 47–53 (In Russian).

Bondur V.G., Gaponova Ye.V. Registratsiya iz kosmosa anomalnykh variatsiy lineamentnykh sistem Baykalskoy riftovoy zony v period zemletryaseniya s magnitudoy M = 5.6, sostoyavshegosya 21 sentyabrya 2020 goda (Registering from Space Anomalous Variations of Baikal Rift Zone Lineament Systems during the M = 5.6 Earthquake Occurred on September 21, 2020) // Issledovanie Zemli iz Kosmosa. 2021. № 2. P. 3–14. DOI: 10.31857/S0205961421020020 (In Russian).

Bondur V.G., Zverev A.T. A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // Doklady Earth Sciences. 2005. V. 402. № 4. P. 561–567.

Bondur V.G., Smirnov V.M. Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations record-

ed by satellite navigation systems // Doklady Earth Sciences. 2005. V. 403. № 5. P. 736–740.

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblov G.M., Shalimov S.L. Geomechanical models and ionospheric variations related to strongest earthquakes and weak influence of atmospheric pressure gradients // Doklady Earth Sciences. 2007. V. 414. № 4. P. 666–669. DOI: 10.1134/S1028334X07040381

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V. Connection between variations of the stress–strain state of the Earth's crust and seismic activity: the example of Southern California // Doklady Earth Sciences. 2010. V. 430. Part 1. P. 147–150. DOI: 10.1134/S1028334X10010320

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V. The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismicity // Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2016. V. 52. № 1. P. 117–128. DOI: 10.1134/S1069351316010043

Bondur V.G., Zakharova L.N., Zakharov A.I., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Monitoring Landslide Processes by Means of L-Band Radar Interferometric Observations: Using the Example of the Bureya River Bank Caving // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. V. 56. № 9. P. 1053–1061. DOI: 10.1134/S0001433820090078

Bondur V.G., Pulinets S.A., Kim G.A. Role of variations in galactic cosmic rays in tropical cyclogenesis: evidence of

- Hurricane Katrina // *Doklady Earth Sciences*. 2008. V. 422. № 7. P. 1124–1128. DOI: 10.1134/S1028334X08070283
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Tubanov Ts.A., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Analysis of the Block-fault Structure Dynamics in the Area of Earthquakes in 2008 and 2020 on the Southern Lake Baikal by the Methods of Satellite Radiointerferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 495. Part 2. P. 921–924
- Laperdin V.K. Meropriyatiya po utilizatsii i khraneniyu lignin-soderzhashchikh promyshlennykh i zhidkikh bytovykh otkhodov v bassejne oz. Baykal (Measures for the disposal and storage of lignin-containing industrial and liquid household waste in the lake Baikal) // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya*. 2018. № 3. P. 77–85. DOI: 10.7868/S0869780318030092 (In Russian).
- Ob'yekt nakoplennogo ekologicheskogo vreda (Baykalskiy TSBK) (Accumulated environmental damage object (Baikal PPM)), 2021 (https://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2021/04/2021_BCBK.pdf)
- Chebykin E.P., Dambinov YU. A., Suturen A.N. Multi-element analysis of above-sludge waters in the accumulation cells of Baykalsk Pulp and Paper Mill for territory remediation strategy choosing // *Water and Ecology*. 2020. № 4(84). P. 67–80. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80
- Amani M., Ghorbanian A., Ahmadi S.A., Kakooei M., Moghimi A., Mirmazloumi S.M., Moghaddam S.H.A., Mahdavi S., Ghahremanloo M., Parsian S., Wu Q., Brisco B. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020. V. 13. P. 5326–5350. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3021052.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383. doi: 10.1109/TGRS.2002.803792
- Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N., Bykov M.E., Dmitriev A.V., Kirbizhekova I.I. Comparison of ALOS PALSAR interferometry and field geodetic leveling for marshy soil thaw/freeze monitoring, case study from the Baikal Lake region, Russia // *J. Applied Remote Sensing*. 2016. T. 10. № 1. C. 016006.
- Cigna F., Tapete D. Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico // *Remote Sensing of Environment*. V. 254. 2021. P. 112254. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112254
- Dagurov P.N., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I. Estimation of snow water equivalent from L-band radar interferometry: simulation and experiment // *International J. Remote Sensing*. 2020. T. 41. № 24. C. 9328–9359.
- D'Aranno P.J.V., Di Benedetto A., Fiani M., Marsella M., Moriero I., Palenzuela Baena J.A. An Application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique for Infrastructure Monitoring // *Remote Sens*. 2021. V. 13. № 6. P. 1052. DOI: 10.3390/rs13061052
- DeVriesa B., Huang C., Armston J., Huang W., Jones J.W., Lang M.W. Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine // *Remote Sensing of Environment*. 2020. 240. 111664
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001. V. 39. № 1. P. 8–20. DOI: 10.1109/36.898661
- Huang Z., Zhang G., Shan X., Gong W., Zhang Y., Li Y. Co-Seismic Deformation and Fault Slip Model of the 2017 Mw 7.3 Darbandikhan, Iran–Iraq Earthquake Inferred from D-InSAR Measurements // *Remote Sens*. 2019. V. 11. № 21. P. 2521. DOI: 10.3390/rs11212521
- Gabriel A., Goldstein R., Zebker H.A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry // *J. Geophys. Res*. 1989. V. 94. № B7. P. 9183–9191.
- Rosen P.A., Henseley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R. Synthetic aperture radar interferometry // *Proc. IEEE*. 2000. V. 88. № 3. P. 333–382.
- Ge P., Gokonb H., Meguroc K. A review on synthetic aperture radar-based building damage assessment in disasters // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 240. 111693. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111693
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sens. Environ*. 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3021052
- Grandin R., Vallée M., Lacassin R. Rupture Process of the Mw 5.8 Pawnee, Oklahoma, Earthquake from Sentinel-1 InSAR and Seismological Data // *Seismol. Res. Lett*. 2017. V. 88. № 4. P. 994–1004. DOI: 10.1785/0220160226
- Ji L., Zhang W., Liu C., Zhu L., Xu J., Xu X. Characterizing interseismic deformation of the Xianshuihe fault, eastern Tibetan Plateau, using Sentinel-1 SAR images // *Adv. Space Res*. 2020. V. 66. № 2. P. 378–394. DOI: 10.1016/j.asr.2020.03.043
- Le Cozannet G., Kervyn M., Russo S., Ifejika Speranza C., Ferrier P., Fomelis M., Lopez T., Modaresi H. Space-Based Earth Observations for Disaster Risk Management // *Surveys in Geophysics*. 2020. V. 41. P. 1209–1235. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09586-5>
- Liu X., Tong X., Ding K., Zhao X., Zhu L., Zhang X.D. Measurement of Long-Term Periodic and Dynamic Deflection of the Long-Span Railway Bridge Using Microwave Interferometry // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens*. 2015V. 8. P. 4531–4538.
- McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International J. Remote Sensing*. 1996. V. 17. № 7. P. 1425–1432.
- Milillo P., Giardina G., DeJong M.J., Perissin D., Milillo G. Multi-Temporal InSAR Structural Damage Assessment: The London Crossrail Case Study // *Remote Sens*. 2018. V. 10. P. 287.
- Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: The case study of Rydułtowy mine in Poland // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. № 2. P. 242. DOI: 10.3390/rs12020242
- Sousa J.J., Bastos L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Nat. Hazard. Earth Syst*. 2013. V. 13. P. 659–667.
- Tay C.W.J., Sang-HoYun, Shi Tong Chin, Alok Bhardwaj, Jungkyo Jung, Hill E.M. Rapid food and damage mapping using synthetic aperture radar in response to Typhoon Hagibis, Japan // *Scientific Data*. 2020. 7: 100. DOI: 10.1038/s41597-020-0443