

Долговременный мониторинг состояния зоны Бурейского оползня методами дистанционного зондирования

А.И. Захаров, Л.Н. Захарова

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, пл. Введенского, 1, 141190, Московская область, г. Фрязино, e-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

В докладе приведены результаты интерферометрических измерений смещений поверхности на месте Бурейского оползня, произошедшего в декабре 2018 г., по долговременным сериям наблюдений радаров L-диапазона PALSAR-1/2 (годы 2006-2017) и радара C-диапазона Sentinel-1 (годы 2016-2018). Построенный график скоростей смещения поверхности оползня на 11-летнем интервале времени показывает влияние метеосаждков на динамику оползневого процесса. Выявлены две составляющие скорости-повышенные локальные значения вследствие обильных дождевых осадков в теплое время года, эффект которых наблюдается и в течение ~2 месяцев после окончания дождей, а также сравнительно небольшая составляющая, которая монотонно нарастала в течение 2006-2018 гг. от 2 см/мес до 4-5 см/мес. Судя по имеющимся метеоданным, можно предположить корреляцию между ростом этой компоненты скорости с ростом годового количества осадков.

The paper contains results of interferometric measurements of surface displacements for the Bureya landslide occurred in December, 2018 using long-term observations of L-band PALSAR-1/2 and C-band Sentinel-1 radars. The plot of surface displacements velocity on the eleven years' time interval shows influence of precipitations on the dynamics of the landslide process. Two components of the velocity were delineated – increased local displacements velocity because of heavy rainfall in warm season with rainfall consequences being observed two months later on, and relatively low component, which was increasing monotonously from 2 cm/month to 4-5 cm/month during 2006-2018. According to meteorological data available, we may assume correlation between the growth of this velocity component with the increase in the annual rainfall.

Радиолокационная интерферометрия является широко используемым дистанционным методом измерения мелкомасштабных сдвигов на поверхности Земли — таких, как смещения в результате землетрясений [1], движения ледников [2], оседания грунта техногенного характера [3] и иных причин. Для территорий, покрытых растительностью, L-диапазон радиоволн является предпочтительным при интерферометрической обработке с целью выявления динамики поверхности, поскольку не столь подвержен декорреляции за счёт мелкомасштабных изменений рассеивающей поверхности даже на весьма длительных интервалах времени между съёмками - по сравнению с более коротковолновыми диапазонами С и Х. Однако в ряде случаев данные С-диапазона также оказываются пригодны для анализа динамики подстилающих покровов методами радарной интерферометрии: длинные серии данных с постоянным, хотя и малым интервалом между съёмками дают информацию, какое время года и какие погодные условия благоприятны для получения информативных интерферограмм; серии карт когерентности полезны для выявления нестабильных участков; сравнение подвижного участка с соседними стабильными областями выявляет особенности динамики. В данной работе рассматриваются результаты применения метода радарной интерферометрии с использованием данных L- и С-диапазонов для исследования долговременной динамики поверхности оползневого склона на реке Бурее вплоть до катастрофического схода грунта в реку.

Территория исследования и использованные данные

Масштабный сход оползня на реке Бурея в декабре 2018 года на 80 км ниже по течению от поселка Чекунда привлек всеобщее внимание, поскольку в результате катастрофического схода грунта было перекрыто русло реки, что создало угрозу затопления близлежащих населенных пунктов, а также разрушения объектов жилой и промышленной инфраструктуры, расположенных у реки ниже по течению, из-за прогнозируемого на весну прорыва естественной плотины. Раннее выявление и предсказание такого рода катастрофических явлений является важной задачей.

Бурея — один из самых многоводных притоков Амура. Питание реки смешанное, паводки носят муссонный характер. Климат здесь резко континентальный с температурами летом 28°C, а зимой -25°C. Самый дождливый месяц года — июль с 10 дождливыми днями и месячным количеством осадков до 140 мм. До создания Бурейского водохранилища, наводнения наблюдались почти ежегодно, катастрофические паводки случались раз в 10 лет. Узкое каньонное русло реки в районе оползня — это средняя часть 230-километрового водохранилища. Вследствие подъема воды ширина реки здесь выросла за три года с 200 до 400 метров, а русло ручья Средний Сандар, впадающего в Бурею напротив места оползня, оказалось затоплено на расстоянии 1,6 км вверх по течению. Судя по цифровым моделям рельефа SRTM и TanDEM-X, уровень воды в устье ручья поднялся не менее чем на 60 метров. Поскольку отрезок реки в районе оползня является частью водохранилища, сезонные колебания уровня воды вблизи плотины порядка 16-19 метров наблюдаются и здесь, они являются причиной обезлесения в узкой прибрежной полосе на береговых склонах и, вероятно, причиной развития оползневых процессов. Существенной особенностью окружающей местности в районе русла реки с оползевым участком, влияющей на эффективность применения методов радарной интерферометрии, является наличие развитого растительного слоя на земной поверхности — лиственных лесов, по северным склонам они зеленомошные, а по южным — травяные.

Для выявления предвестников оползня в виде мелкомасштабных подвижек поверхности нами были проанализированы возможности различных современных космических радаров с синтезированной апертурой в плане доступности архивных данных, приемлемости геометрии интерферометрической съемки времени проведения измерений. К сожалению, почти все общедоступные данные радарной съемки зоны оползня, которые можно было бы использовать для изучения долговременной истории развития оползневого процесса на Бурея, проводились в коротковолновых диапазонах и, как правило, со слишком большими интервалами между повторяющимися съемками, что имело следствием практически полную декорреляцию отраженных оползневой зоной сигналов. Это относится к данным ERS-2 (съемки 1995-2011 гг.), ENVISAT (2002-2012 гг.), TerraSAR-X (2007-н.вр.). Использованные нами данные радара Sentinel-1 являются исключением в том плане, что архив доступных для анализа данных района оползня на Бурея покрывает интервал времени с осени 2016 года по настоящее время с относительно коротким интервалом между съемками 12 дней, а размер пространственной/интерферометрической базы не превышал 200 м.

Показателем информативности фазовой информации на интерферограмме является когерентность, показывающая степень декорреляции двух изображений:

$$\gamma = \frac{E\{z_1 \cdot z_2^*\}}{E\{|z_1|^2\}E\{|z_2|^2\}}$$

где z_1 и z_2 — комплексная величина обратного рассеяния, полученная при первой и второй съемке,

$E\{\}$ — операция пространственного усреднения.

Фаза величины γ , равная разности фаз, полученных при первой и второй съёмках, взята в каждом элементе изображения, составляет интерферограмму, а модуль γ определяет степень декорреляции двух изображений: от 0 (полная декорреляция) до 1 (идеальная корреляция).

Радар спутника Sentinel-1 проводит съёмку в С-диапазоне (длина волны 5,6 см). Временная декорреляция отраженных сигналов этого диапазона особенно сильно проявляется при съёмке поверхности, покрытой растительностью. Сильное ветровое волнение крон деревьев или изменение влажности отражающей поверхности вследствие, например, дождя приводят к снижению когерентности и потере информации о разности фаз. Сравнительно крупномасштабные, масштаба половины длины волны и более, хаотические смещения фрагментов поверхности также приводят к декорреляции. Напротив, замерзание влаги почвы и растительных покровов зимой повышает стабильность отражения и улучшает когерентность. Для сравнения значений когерентности в летнее и зимнее время года на рис. 1 приведен график когерентности по трем тестовым участкам для 42 интерферометрических пар сеансов Sentinel-1, проведенных в период 9.11.2017–16.03.2019 (даты первой и второй съёмки пары приведены по горизонтальной оси через дефис в формате ггггммдд).

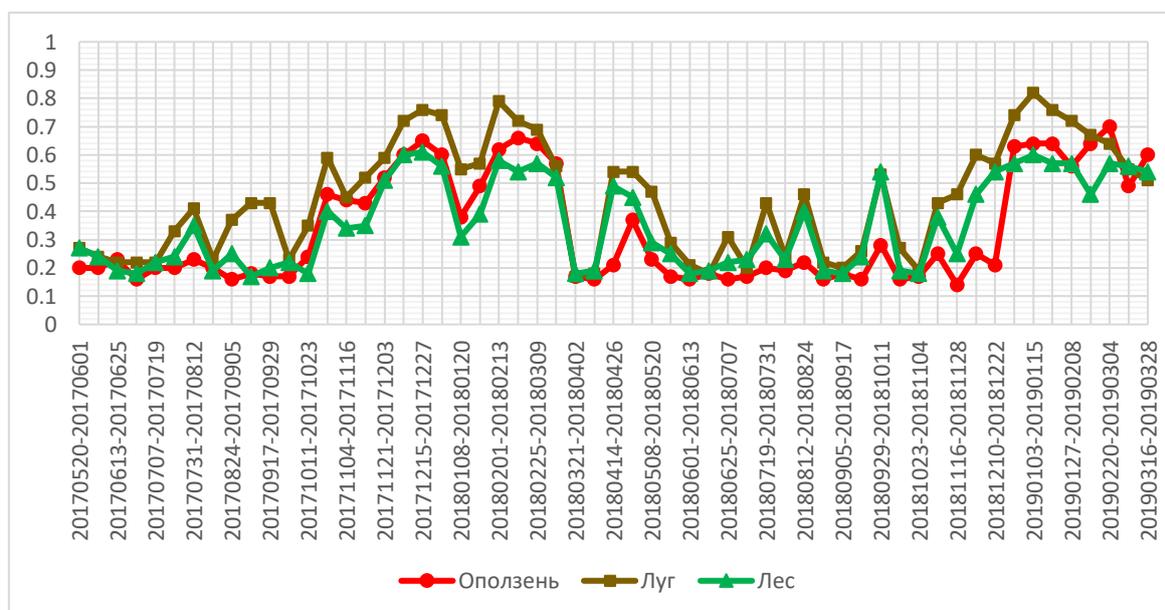


Рис. 1. Когерентность на трёх тестовых участках в 2017-2019 гг. Даты первой и второй съёмки в парах приведены в формате ггггммдд.

На графиках видно, что луг, будучи свободным от деревьев, имеет самую высокую стабильность между съёмками (коричневая линия на графике), причём величина когерентности значительно выше зимой по сравнению с тёплым временем года. Летом и осенью встречаются отдельные пики на уровне 0.4-0.5, однако они невелики по сравнению с зимними 0.6-0.8. Покрытые лесом склоны (оползневый и стабильный, красный и зелёный цвет, соответственно) обладают меньшей когерентностью, однако в зимнее время достаточной для того, чтобы выполнять фазовые измерения по большинству интерферометрических пар. По зиме 2017-2018 гг. заметно, что когерентность на оползневом склоне чуть выше, чем на лесе. Связывать это можно с плотностью деревьев: на оползневом склоне их густота меньше, в результате чего образуется происхождение рассеяния как от деревьев, так и от поверхности земли, куда частично проникает сигнал. В тёплое время года, однако, когерентность на оползневом

склоне почти во всех парах наименьшая, что говорит о нестабильности этого участка. К снижению когерентности приводят, как правило, изменившиеся в результате погодных факторов условия рассеивания. На оползневом склоне дополнительным фактором декорреляции может стать хаотическое отклонение стволов деревьев от вертикали в результате постоянного сползания грунта, обозначаемое термином «пьяный лес». За 12 дней изменения наклона могут быть незаметными глазу, но при этом эффективные фазовые центры соседних элементов изображения сместятся по-разному, что приведёт к хаотичной фазовой картине. Осадки, изменения влажности и температуры воздуха могут привести к резкому падению когерентности на всех трёх тестовых участках, как это видно, например, на парах 8-20 января и 21 марта-2 апреля 2018 г. Но в первом случае (зимой) снизившаяся когерентность принимает значения не ниже 0.3, что оставляет возможность проводить фазовые измерения с некоторой степенью достоверности, а во втором (весной) на всех трёх участках падает ниже 0.2, что близко к полной декорреляции.

Типичная интерферограмма из набора пригодных для анализа фазовой информации, с явными признаками подвижек оползневого склона (светлое пятно), приведена на рис. 2. Светлые (по сравнению с окружающим тёмным фоном) тона на рис. 2б) обозначают смещение поверхности от радара за время между съёмками, что в нашем случае соответствует движению вниз по склону в сторону реки (река находится за верхним обрезаем рисунка).

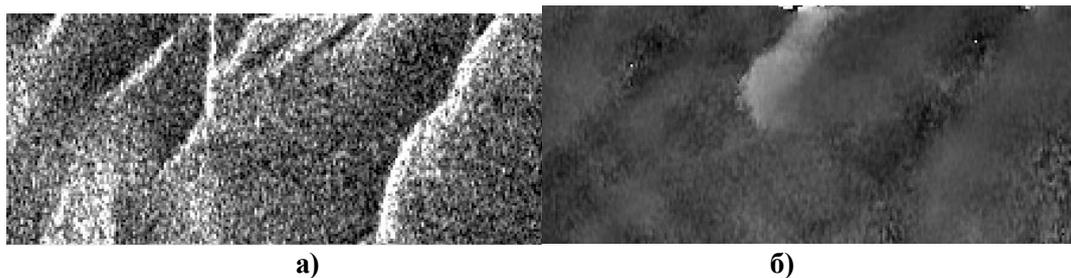


Рис. 2. Амплитудное изображение (а) и интерферограмма (б) окрестностей оползневого участка на Буре, построенная по данным 25.02-09.03.2018.

В связи с неинформативностью значений интерферометрической разности фаз в тёплое время года измерения были выполнены только для серий зимних интерферограмм. Результаты измерений подвижек из [1], пересчитанные к месячному интервалу наблюдений, представлены в правой части рисунка 5 ниже.

Более подходящим инструментом, данные которого устойчивее к временной декорреляции, могут быть радары более длинноволнового, L-диапазона. Используемые нами в данной работе снимки японского космического радара PALSAR-1 (длина волны 24 см) доступны для анализа начиная с лета 2006 года, когда водохранилище ещё только заполнялось водой, по март 2011 года. Съёмки радаром PALSAR-2 (также 24 см) проводятся с осени 2014 года по настоящее время. Особенностью орбиты спутника ALOS-1 является 46-дневный минимальный интервал повторной съёмки — таким образом, можно получать интерферометрические пары, промежуток между которыми кратен 46 суткам. Вследствие дрейфа орбитальных параметров и редких, но существенных коррекций орбиты интерферометрическая база менялась в пределах 0-20 км за 2 года функционирования спутника. Интервал повторной (интерферометрической) съёмки спутника ALOS-2 с радаром PALSAR-2 кратен 14 дням.

В архиве Японского космического агентства JAXA имеются 32 снимка района оползня, выполненные радаром PALSAR-1, а также 16 снимков PALSAR-2, которые

формально пригодны для интерферометрической обработки. Важным показателем качества интерферометрических измерений также является когерентность сигналов интерферометрической пары. Благодаря сравнительно большой длине волны сигнала этих радаров временная стабильность отражений оказывается более высокой по сравнению с С-диапазоном, вследствие чего из снимков, полученных в зимнее время года, например, можно составлять достаточно информативные интерферометрические пары с интервалом между съемками до 2 лет. При этом летние снимки менее пригодны для измерений из-за значительной временной декорреляции эхо-сигналов, вызванной сильными дождями незадолго или во время съемки.

Архивные снимки радаров PALSAR-1/2 подвергались тщательному отбору при составлении интерферометрических пар. В первую очередь снимки были разбиты на зимние и летние. К зимним отнесены снимки, сделанные при отрицательной средней температуре воздуха за три дня до съемки, включая день съемки. Зимние и летние снимки не объединялись в интерферометрические пары вследствие сильно меняющихся диэлектрических свойств отражающей поверхности при замерзании, что приводит к резкому снижению когерентности. Кроме того, из рассмотрения были исключены пары снимков, где база интерферометра превышала 4 км [2-3].

На рис. 3 представлены для примера значения интерферометрической когерентности для 23 пар снимков радара ALOS-1 по территории оползневой зоны. Наиболее высокая когерентность у пар снимков, полученных в холодное время года (ромбовидные маркеры), причем с ростом интервала между съемками пары снимков когерентность ожидаемо падает. Достаточно высока когерентность нескольких снимков, полученных в сухую погоду летом (треугольники). Дождливая погода в дни съемки или предшествующие съемке дни с суммарным количеством осадков более 20 мм за 4 предшествовавших съемке дня привела к сильному падению когерентности и потере информативности фазовых измерений. Описываемые далее результаты измерений подвижек поверхности получены при анализе пар снимков с когерентностью выше 0.3.

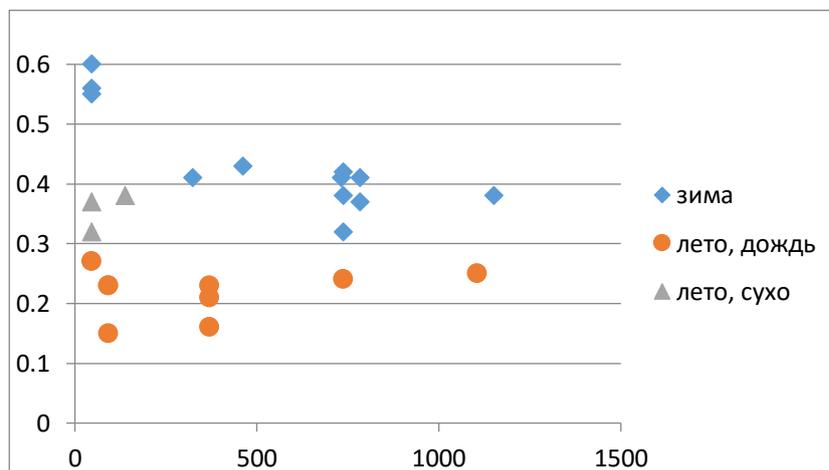


Рис. 3. Когерентность сигналов ALOS-1 (вертикальная ось) в зависимости от интервала между съемками интерферометрической пары (горизонтальная ось, дни).

После обработки отобранных 42 пар изображений и анализа результатов информативными, в соответствии с приведенными выше уровнями когерентности, признаны только 12 интерферограмм. На рис. 4 показана летняя дифференциальная интерферограмма со спутника ALOS-2 с интервалом между съемками 28 дней (15.06.2016-13.07.2016). На темном фоне суши ярко выделяется зашумлённая полоса реки с тремя крупными северными притоками и одним южным. Оползневая зона,

находящаяся на противоположном берегу от устья ручья СреднийСандар, хорошо заметна в виде вытянутого светлого пятна по сравнению с окружающим более темным фоном и заключена в белое кольцо. В принятой схеме обработки смещение отражающей поверхности в сторону от радара за время между съемками приводит к увеличению разности фаз, переданному светлыми тонами на интерферограмме. Неоднородная яркость пятна свидетельствует о более высокой скорости движения в верхней части оползня, вблизи будущей стенки отрыва.

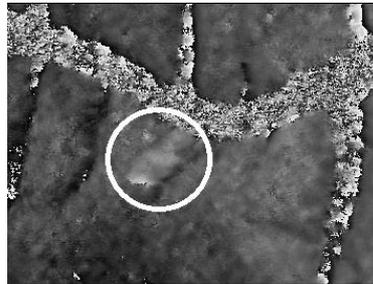


Рис. 4. Фрагмент летней интерферограммы ALOS-2 от 15.06.2016-13.07.2016, содержащий зону оползня.

На рисунке 5 ниже сведены на одном графике измерения подвижек поверхности оползневого склона по данным PALSAR-1/2 (левый фрагмент), Sentinel-1 зимой 2016-2017 гг. (средний фрагмент) и Sentinel-1 зимой 2016-2017 гг. (правый фрагмент), пересчитанные на направление вдоль по склону и нормированные к месячному интервалу между съемками.

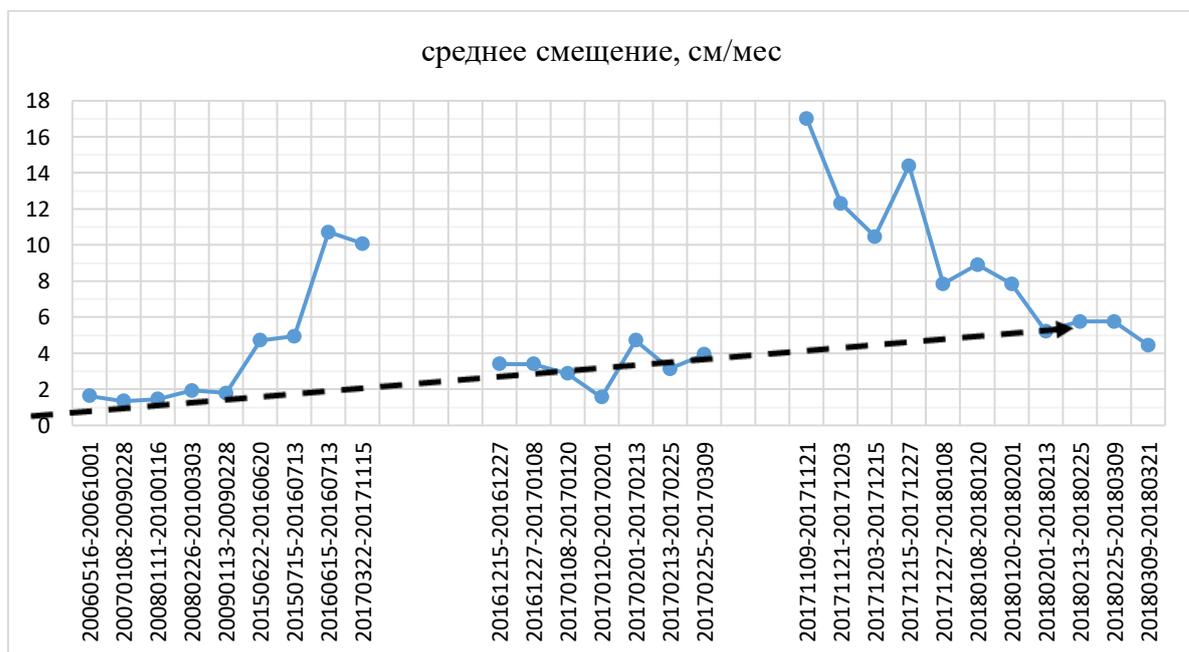


Рис. 5. Измерения подвижек поверхности оползневого склона по данным PALSAR-1/2 (левый фрагмент), Sentinel-1 зимой 2016-2017 гг. (средний фрагмент) и Sentinel-1 зимой 2016-2017 гг. (правый фрагмент).

Черной пунктирной линией показан предположительный многолетний тренд в значении средней скорости перемещения оползневого склона, который коррелирует с трендом в графике годичного количества осадков в период 2006-2019 гг. по данным сайта gr5.ru [4], представленном на рис. 6. На этом графике стоит отметить anomalно

большое количество осадков в 2013, 2016 и 2018 годах, что могло быть причиной роста средней скорости смещения оползневых масс (пунктирная линия на рис. 5). Кроме того, вследствие высокой временной декорреляции отражений из-за частых дождевых осадков в 2016и более поздние годы большое количество интерферометрических пар снимков радара PALSAR-2 оказалось неинформативным. Повышенные, до 10 см/мес, значения скорости на рис. 5 по данным пар снимков радара PALSAR-2 (две последние точки левого фрагмента графика) могут быть объяснены тем, что эти интервалы съемки (красные отрезки с номерами, соответственно, 1 и 2 на рис. 7, описывающем распределение дождевых осадков по месяцам в течение 2016-2018 гг.) не включают в себя зимнее время года, когда нет поступления влаги в почву.



Рис. 6. Годичное количество осадков в период 2006-2019 гг.



Рис. 7. Распределение дождевых осадков по месяцам за 2016-2018 гг., мм.

Стрелкой с номером 3 на рис. 7 отмечено начало измерительного интервала 15 декабря 2016 года для серии снимков Sentinel-1, покрывающих зимний интервал 2016-2017 гг. Отсутствие в течение почти полутора месяцев каких-либо значительных объемов дождевых осадков перед началом интервала наблюдений, вероятно, является причиной равномерной скорости смещения поверхности оползня в течение всей зимы. В то же время, для начала измерительного интервала 09 ноября 2017 года серии снимков Sentinel-1, покрывающих зимний интервал 2017-2018 гг., попадающего на

конец интервала дождевых осадков(стрелка с номером 4 на рис. 7),характерна повышенная скорость смещения поверхности 17 см/мес, плавно спадающая через два месяца до средней зимней скорости 4-5 см/мес.

Анализируя графики скоростей смещений поверхности оползня и метеоданные, можно выделить две составляющие: повышенные локальные значения скорости вследствие обильных дождевых осадков в теплое время года, эффект которых наблюдается вплоть до ~2 месяцев после окончания дождей, а также сравнительно небольшую составляющую, которая монотонно нарастала в течение 2006-2018 гг. от 2 см/мес до 4-5 см/мес. Эта составляющая проявляется в наиболее чистом виде при наблюдениях в холодное время года, спустя ~2 месяца после окончания периода дождевых осадков. Судя по представленным графикам, можно предположить корреляцию между ростом этой компоненты скорости с ростом годичного количества осадков.

Заключение

Исследована динамика оползневого процесса на реке Бурея по результатам интерферометрических измерений смещений поверхности по данным радаров L-диапазона PALSAR-1/2 в 2006-2017 годах и радара C-диапазона Sentinel-1 с декабря 2016 по март 2018года. На графике скорости смещения поверхности оползня на 11-летнем интервале показано влияние метеосадков на динамику оползневого процесса. Выявлены две составляющие скорости: повышенные локальные значения вследствие обильных дождевых осадков в теплое время года, эффект которых наблюдается и в течение ~2 месяцев после окончания дождей, а также сравнительно небольшая составляющая, которая монотонно нарастала в течение 2006-2018 гг. от 2 см/мес до 4-5 см/мес. Судя по представленным метеоданным, можно предположить корреляцию между ростом этой компоненты скорости с ростом годичного количества осадков.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00816). Данные предоставлены Японским аэрокосмическим агентством JAXA и Европейским космическим агентством ESA в рамках научных проектов.

Литература

1. Захарова Л.Н., Захаров А.И., Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурея по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Т. 16 № 2, 2019, С. 273-277
2. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н., Долговременный мониторинг оползневого процесса на берегу реки Бурея по данным интерферометрической съёмки радаров L-диапазона// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Т. 16, № 5, 2019 , с. 113-119
3. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н., Возможности наблюдения оползневых процессов с помощью интерферометрической съёмки радарными L-диапазона на примере реки Бурея// Исследование Земли из космоса, № 5, 2019 , с. 3-14
4. Расписание погоды. –Режим доступа: rp5.ru.