

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**МЕТОДЫ РАДАРНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ЗОНАХ ОПОЛЗНЕЙ НА ПРИМЕРЕ ОБРУШЕНИЯ СКЛОНА БЕРЕГА РЕКИ БУРЕЯ**

© 2019 г. В. Г. Бондур<sup>1,\*</sup>, Т. Н. Чимитдоржиев<sup>2,\*\*</sup>, А. В. Дмитриев<sup>2</sup>, П. Н. Дагуров<sup>2</sup>,  
А. И. Захаров<sup>3</sup>, Л. Н. Захарова<sup>3,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

\*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

\*\*E-mail: tchimit@gmail.com

\*\*\*E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 17.07.2019 г.

Анализируются возможности методов радарной поляриметрии для идентификации оползневых зон. В качестве ключевого признака оползневых зон использовался факт трансформации доминирующего механизма рассеяния сигнала отражающей поверхностью. Для четырех тестовых участков, выбранных в районе оползня, вызванного обрушением склона берега реки Бурья, проведена обработка поляриметрических данных, полученных радаром PALSAR-2 спутника ALOS-2 с использованием декомпозиций Фримена–Дурдена и Клауда–Потье. Установлено, что результаты декомпозиций согласуются друг с другом, однако у некоторых участков наблюдаются существенные различия, обусловленные спецификой базовых модельных положений. Показано, что до схода оползневых масс на анализируемом участке присутствовали три основных механизма рассеяния радарного сигнала: однократное поверхностное, объемное и двукратное рассеяние. После обрушения на этой территории доминирует однократное рассеяние, характерное для отражающей поверхности с крупномасштабными неровностями, свободной от растительного покрова, благодаря чему зона схода оползня может уверенно распознаваться. Продемонстрирован значительный потенциал использования метода радарной поляриметрии для дистанционной диагностики последствий оползневых явлений.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, радиолокационная поляриметрия, оползень, механизмы радарного рассеяния, декомпозиция поляриметрических сигналов

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201943-17>

### ВВЕДЕНИЕ

Космические методы и средства широко используются для мониторинга различных природных катастроф, таких как землетрясения (Акопян и др., 2017; Бондур, Зверев, 2005, 2007; Бондур, Смирнов, 2005; Бондур и др., 2007, 2010, 2016а, б), оползней (Захаров и др., 2018; Захаров, Захарова, 2019; Захарова и др., 2019; Бондур и др., 2019; Михайлов и др., 2014; Shirzaei et al., 2017), тайфуны (Бондур и др., 2008а, б, 2009) и др. (Бондур и др., 2009, 2010, 2012). Одними из наиболее перспективных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса являются радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) (Верба и др., 2010; Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б, 2019; Бондур, Старченков, 2001; Бондур, 2010; Дмитриев и др., 2014; Захаров и др., 2012; Chimitdorzhiev et al., 2016). Преимуществом радарного зондирования является независимость процесса получения изображений

от освещенности снимаемой поверхности и наличия облачности. Это обстоятельство позволяет выполнять радиолокационный мониторинг чрезвычайных ситуаций (Бондур и др., 2009; 2012), в том числе оползней (Захаров и др., 2018; Михайлов и др., 2014; Shirzaei et al., 2017), наводнений (Дубина и др., 2018), последствий цунами (Watanabe et al., 2016) и т.д. Мониторинг оползней является важной сферой применения поляриметрических методов дистанционного зондирования (Захаров и др., 2019; Захарова и др., 2019; Бондур и др., 2019; Czuchlewski et al., 2003; Yonezawa et al., 2012; Shimada et al., 2014; Li et al., 2014а, б; Luo et al., 2016; Shibayama et al., 2015; Watanabe et al., 2016).

В настоящей работе анализируются возможности методов радиолокационной поляриметрии для оценки изменений отражательных свойств земной поверхности на примере оползневого события, произошедшего в декабре 2018 г. на реке Бурья. Первые

сведения о крупномасштабном сходе оползневых масс, произошедшем 11 декабря 2018 г., были получены с помощью снимков оптического сенсора Sentinel-2B и многоспектрального сканера (тепловизора) Himawari-8 (Крамарева и др., 2018). Установлено, что площадь зоны обрушения вместе с насыпью в русле реки составила порядка 0.4 км<sup>2</sup>, ориентировочное время схода грунта в реку — 4:30 GMT 11 декабря 2018 г. Анализ Бурейского оползня методом радарной интерферометрии на основе данных радара Sentinel-1 проведен в работах (Захаров и др., 2019; Захарова и др., 2019) и на основе данных ALOS-2 PALSAR-2 (Бондур и др., 2019).

### ВЫБОР МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности взаимодействия радиоволн со сложными структурами поверхности, дающими многократное переотражение или имеющими пространственную анизотропию, могут быть выявлены с помощью поляризационных измерений. Такие измерения обеспечиваются поляриметрическим РСА, излучающим, например, линейно поляризованные волны с вертикальной ( $V$ ) и горизонтальной ( $H$ ) поляризациями и принимающим отраженный сигнал на согласованных (сигналы  $VV$  и  $HH$ ) и ортогональных ( $VH$  и  $HV$ ) поляризациях. Этот многоканальный поляриметрический режим работы радара значительно повышает информативность измерений (Cloude, 2010; Lee, Pottier, 2009).

Результатом измерения поляриметрического РСА является матрица рассеяния

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $S_{ij}$  — комплексные коэффициенты рассеяния при излучении на  $j$ -поляризации и приеме на  $i$ -поляризации.

Физической основой методов радарной поляриметрии является зависимость поляризационного состояния радарного сигнала от механизма обратного рассеяния радиоволн земными объектами. Различного рода преобразования матрицы рассеяния позволяют выявить эти механизмы и тем самым идентифицировать различные объекты. Отметим, что при моностатическом зондировании выполняется условие  $S_{HV} = S_{VH}$ .

В работе (Czuchlewski et al., 2003) для определения изменений отражательных свойств поверхности, вызванных оползнем после землетрясения в Тайване, был использован самолетный поляриметрический РСА L-диапазона. Декомпозиция матрицы рассеяния поверхности по методу Клауда–Потье (Cloude, Pottier, 1997) позволила определить характер изменений механизмов рассеяния

земной поверхности вследствие схода оползня. Было отмечено, что снимков РСА, полученных на одной поляризации, недостаточно для идентификации и картирования оползней.

В работе (Yonezawa et al., 2012) для обнаружения оползней, вызванных землетрясением в Японии в 2008 г., использовались поляриметрические данные спутника L-диапазона PALSAR. Вклад различных механизмов рассеяния на поверхности оползневых участков изучался с использованием методов декомпозиции Фримена–Дурдена (Freeman, Durden, 1998) и Клауда–Потье. По данным декомпозиции Фримена–Дурдена, в областях, затронутых крупномасштабными оползнями, преобладает компонента поверхностного рассеяния. Параметры декомпозиции Клауда–Потье, такие как энтропия  $H$ , анизотропия  $A$  и угол  $\alpha$ , также были рассчитаны для оползневых участков.

Автоматическая классификация, основанная на сегментации этих параметров на плоскости  $H$ - $\alpha$ , однозначно отличает оползневые участки от других объектов, таких, как лес, вода и заснеженные районы, но она неэффективна при наличии сельскохозяйственных угодий в пределах радиолокационного изображения. Оползневый участок трудно идентифицировать на одноканальном изображении, в то же время он уверенно распознается при анализе поляриметрических снимков. Было установлено, что при обнаружении зон оползней поляриметрические изображения с разрешением 30 м более информативны, чем одноканальные снимки с разрешением 10 м.

В работе (Shimada et al., 2014) проведена оценка эффективности применения поляриметрических многочастотных радаров с синтезированной апертурой для обнаружения оползневых зон в покрытых лесом горах. Результаты показывают, что РСА X-диапазона менее эффективны при выявлении оползней, поскольку проникновение волн этого диапазона сквозь слой леса меньше, чем в L-диапазоне.

Поляриметрический отклик зон оползней в X-диапазоне также изучался с помощью самолетной радиолокационной системы с синтезированной апертурой высокого разрешения в Китае (Li et al., 2014a). Поляриметрические разложения, включая четырехкомпонентное разложение Ямагучи (Yamaguchi et al., 2005) и разложение Клауда–Потье, использовались для анализа механизмов рассеяния нескольких оползней, вызванных землетрясением в 2008 г. на юго-западе Китая. Экспериментальные данные X-диапазона показывают, что для участков, подверженных крупномасштабным оползням, характерна смесь поверхностного, двойного и объемного рассеяния. Представлены также

результаты классификации, основанной на контролируемых параметрах классификатора Уишарта (Ferro-Famil et al., 2001) и параметрах сходства поляриметрического рассеяния, которые позволяют хорошо отличать области оползней от других типов поверхностей, таких, как лес и вода.

В работе (Li et al., 2014b) использованы наборы радарных изображений, полученные с помощью полностью поляриметрической бортовой радиолокационной системы с синтезированной апертурой высокого разрешения X-диапазона. Элементы разложения Паули, полученные в результате преобразования матрицы рассеяния, объединялись в RGB псевдоцвете и преобразовывались в цветовое пространство интенсивности-насыщенности-оттенка (HSI). Затем сочетание кластеризации по методу *k*-средних и изображений HSI из разных каналов использовалось поэтапно для автоматического выделения зон оползней.

В статье (Luo et al., 2015) обсуждается способ идентификации оползней, основанный на методах поляриметрического разложения данных C-диапазона, полученных до и после схода оползня, с последующим применением классификатора Уишарта (Ferro-Famil et al., 2001). Анализ поляриметрических признаков трех оползней, вызванных землетрясением в Китае в 2008 г., показывает, что доминирующим механизмом рассеяния сигнала оползнями является поверхностная составляющая рассеяния с энтропией рассеяния между 0.6 и 0.8. Для соседних с оползнем территорий характерно доминирование объемного рассеяния, при этом энтропия рассеяния почти аналогична энтропии на оползневых участках. Путем сравнения расположения областей поверхностного рассеяния на снимке после события с областями объемного рассеяния на снимке до события и комбинирования карт энтропии рассеяния, можно оценить ошибки распознавания оползневых зон.

Работа (Shibayama et al., 2015) посвящена зависимости поляриметрических индексов для оползней под лесными покровами от локального угла падения радиоволны. При изучении отражательных свойств поверхности оползней использовались данные сенсора PolSAR, проводившего съемку с разных направлений. Оказалось, что мощность рассеяния и поляриметрический коэффициент корреляции оползней значительно уменьшаются с локальным углом падения, в то время как для окружающего леса эти показатели не меняются. Это обстоятельство приводит к созданию метода эффективного обнаружения оползневой зоны по поляриметрической информации.

Для выяснения оптимальных параметров полной поляриметрической съемки в L-диапазоне

и угла обзора для обнаружения зоны оползня были проанализированы поляриметрические изображения самолетного радара Pi-SAR-L2 (Watanabe et al., 2016), полученные с четырех различных направлений съемки зоны оползня на острове Идзу Осима, спровоцированного тайфуном 16 октября 2013 г. Несколько поляриметрических параметров, включая коэффициент обратного рассеяния, когерентность между двумя поляриметрическими состояниями, четырехкомпонентные параметры разложения (двойное отражение / объемное / поверхностное / спиральное рассеяние) и параметры разложения по собственным значениям (энтропия / альфа / анизотропия), были рассчитаны для обнаружения оползневых участков. Радиолокационное зондирование переднего (ближнего к радару) склона более предпочтительно для идентификации оползня, тогда как наблюдения с противоположной стороны были менее информативными, что указывает на то, что меньший локальный угол падения обеспечивает лучшее различие оползневых и лесных районов.

В работе (Wang et al., 2016), для оценки смещения оползня, предложен метод, позволяющий выявлять динамику обратного рассеяния. Выполнена оценка различий двух векторов рассеяния Паули за разные даты, что позволило оценить смещение поверхности оползня на юго-западе штата Колорадо, США.

Большинство описанных в литературе подходов к обнаружению оползней на основе PCA используют данные очень высокого разрешения (very high resolution — VHR) при условии проведения съемки незадолго до события оползня, что бывает довольно редко. Современные миссии VHR SAR, например, Radarsat-2, TerraSAR-X или COSMO-SkyMed не охватывают систематически всю земную поверхность из-за различных ограничений. Поэтому в работе (Plank et al., 2016) представлен метод картографирования оползней, основанная на обнаружении изменений между оптическими изображениями до события и поляриметрической энтропией, полученной из поляриметрических данных PCA после события. Как правило, сведения о состоянии поверхности до события доступны из оптических снимков высокого разрешения Landsat-8 или Sentinel-2, которые проводят систематическую съемку всей земной суши.

В настоящей работе для анализа оползневых процессов на примере обрушения склона берега реки Бурья будем использовать два наиболее широко применяющихся метода анализа поляризационных радарных изображений на основе декомпозиции матрицы рассеяния: на основе физической модели декомпозиция Фримена–Дурдена (Freeman, Durden, 1998) и математической модели

с использованием собственных значений и собственных векторов матрицы когерентности (декомпозиция Клауда–Потье) (Cloude, Pottier, 1997). Эти методы применялись не только для изучения оползневых участков, но и окрестностей, включая лес, ледовый покров реки и т.д. При анализе поляриметрических данных использовано программное обеспечение PolSARpro (PolSARpro, 2019).

### АНАЛИЗ ДЕКОМПОЗИЦИЙ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Декомпозиция Фримана–Дурдена (Freeman, Durden, 1998) основана на трехкомпонентной модели мощности матрицы рассеяния. При этом общая мощность обратного рассеяния  $P$  предполагается состоящей из суммы трех независимых слагаемых: мощности однократного (поверхностного) рассеяния, мощности эхо-сигнала, претерпевшего двукратное переотражение структурами, аналогичными двугранному уголкового отражателю, и мощности объемного (многократного) рассеяния:

$$P = |S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 = P_s + P_d + P_v \quad (2)$$

где индексы  $s$ ,  $d$  и  $v$  обозначают поверхностное, двойное и объемное рассеяние соответственно.

Однократное поверхностное рассеяние — типичный механизм рассеяния от почвы или воды. Двойное переотражение встречается при наличии вертикально ориентированных целей на горизонтальной поверхности и часто встречается на застроенных территориях (отражение от земли и стен), а также в лесах (отражения от стволов и почвы). Объемное рассеяние встречается там, где имеется слой разнообразно ориентированных элементарных отражателей — например, ветви деревьев.

В модели используется корреляция между элементами матрицы рассеяния (1), описываемая ковариационной матрицей:

$$\langle C \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \langle \sqrt{2}S_{HH}S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle \\ \langle \sqrt{2}S_{HV}S_{HH}^* \rangle & \langle 2|S_{HV}|^2 \rangle & \langle \sqrt{2}S_{HV}S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV}S_{HH}^* \rangle & \langle \sqrt{2}S_{VV}S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

Модель предполагает статистическую некоррелированность согласованной и перекрестной компонент матрицы рассеяния (1):

$$\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle \approx \langle S_{VV}S_{HV}^* \rangle \approx 0,$$

и, кроме того, ее симметричность  $S_{HV} = S_{VH}$  (поэтому ковариационная матрица имеет размерность  $3 \times 3$ , а не  $4 \times 4$ ).

Используется также ряд допущений, связанных с каждым из механизмов рассеяния в отдельности — таких, как равномерное распределение ориентации

элементарных отражателей диполей в объемном слое, применимость брэгговской модели к поверхностной составляющей рассеяния, диагональность матрицы рассеяния, характеризующей двойное переотражение. После параметризации элементов матрицы рассеяния для каждого из трех механизмов, использующих названные ограничения, получается набор уравнений

$$\begin{aligned} \langle |S_{HH}|^2 \rangle &= |b|^2 f_s + |a|^2 f_d + f_v \\ \langle |S_{HV}|^2 \rangle &= \frac{f_v}{3} \\ \langle |S_{VV}|^2 \rangle &= f_s + f_d + f_v \\ \langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle &= bf_s + af_d + \frac{f_v}{3} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $f_s$ ,  $f_d$  и  $f_v$  — вклады поверхностного, двукратного (уголкового) и объемного рассеяния соответственно;  $a$  и  $b$  — степень корреляции горизонтальной и вертикальной компонент для двукратного и поверхностного рассеяния соответственно.

Таким образом, имеются четыре уравнения с пятью неизвестными. Последнее допущение вводится для того, чтобы получить единственное решение системы: в зависимости от знака действительной части компоненты  $\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle$  доминирующим механизмом рассеяния объявляется либо поверхностное (и тогда  $a = -1$ ), либо двукратное (и тогда  $b = 1$ ).

Модель наилучшим образом работает в условиях, когда вклад либо поверхностного, либо двукратного переотражения невелик. Следует отметить, что второе часто имеет место для естественных покровов в L-диапазоне.

После того как найдены все неизвестные, окончательное разложение мощности  $P$  на три составляющие  $P_s$ ,  $P_d$  и  $P_v$  производится по формулам

$$\begin{aligned} P_s &= f_s (1 + |b|^2) \\ P_d &= f_d (1 + |a|^2) \\ P_v &= \frac{8f_v}{3} = 8 \langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

Декомпозиция Клауда–Потье (Cloude, Pottier, 1997) основана на анализе собственных значений матрицы когерентности, которую получают для вектора рассеяния, записанного в базисе Паули:

$$\mathbf{k}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Здесь, так же, как и в разложении Фримана–Дурдена, предполагается выполненным условие  $S_{HV} = S_{VH}$ . Элементы матрицы когерентности  $[T]$  показывают степень коррелированности элементов вектора  $\mathbf{k}_p$ :

$$\langle [T] \rangle = \frac{1}{2} \left\langle \begin{bmatrix} (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* & (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & 2(S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \\ (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* & (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & 2(S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \\ 2S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* & 2S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* & 4S_{HV}S_{HV}^* \end{bmatrix} \right\rangle \quad (7)$$

Поскольку матрица [7] самосопряженная, то она может быть приведена к диагональному виду

$$[T] = [U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_3^{*T}] \quad (8)$$

где  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$  — собственные значения матрицы  $T$ , являющиеся действительными числами, а унитарная матрица  $[U_3]$  состоит из ее собственных векторов.

В качестве доминирующего механизма рассеяния в модели принимается механизм, соответствующий собственному вектору с максимальным собственным значением  $\lambda_1$ , остальные два вектора описывают второй и третий по частоте встречаемости механизмы рассеяния.

Степень случайности рассеяния описывается энтропией

$$H = \sum_{j=1}^3 -P_j \log_3 P_j \quad (9)$$

где  $P_j$  — вероятность каждого из трех механизмов:

$$P_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (10)$$

Если только одно из собственных значений матрицы когерентности отлично от нуля, то с вероятностью, равной единице, наблюдается единственный механизм рассеяния (детерминистический случай), и  $H = 0$ .

Если, с другой стороны, выделенного механизма рассеяния нет, и  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ , то  $H = 1$ .

Однако оба этих крайних случая в реальности не встречаются, обычно наблюдается промежуточный вариант. Некоторым приближением к  $H = 0$  можно считать случай, когда  $\lambda_1 \gg \lambda_2 \cong \lambda_3$ . Типичный пример — брэгговское рассеяние от шероховатой поверхности. Приближением к  $H = 1$  является рассеяние на облаке хаотически ориентированных диполей, которым моделируют кроны плотных лесов. Высокие значения энтропии указывают, как правило, на наличие растительности.

Параметр  $\alpha$  в декомпозиции Клауда–Потье вычисляется как средневзвешенная величина

$$\tilde{\alpha} = P_1\alpha_1 + P_2\alpha_2 + P_3\alpha_3, \quad (11)$$

где  $\alpha_j$  — один из углов, параметризующих собственный вектор  $e_j$ :

$$[e_j] = e^{i\phi_j} \begin{bmatrix} \cos \alpha_j & \sin \alpha_j \cos \beta_j e^{i\delta_j} & \sin \alpha_j \sin \beta_j e^{i\gamma_j} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

Угол  $\alpha$  принимает значения от  $0^\circ$  (соответствует механизму поверхностного рассеяния) до  $90^\circ$  (соответствует двойному переотражению от идеально проводящей поверхности двугранного уголка). Промежуточное значение  $45^\circ$  отвечает дипольному рассеянию.

В табл. 1 и на рис. 1 представлены результаты сегментации с девятью зонами, соответствующими различным механизмам рассеяния, а также схема с различными механизмами рассеяния на плоскости  $H$ - $\alpha$  (Cloude, Pottier, 1997).

**Таблица 1.** Схема интерпретации результатов классификации  $H$ - $\alpha$

Номер зоны	Энтропия, $H$	Альфа, $\alpha$	Механизм рассеяния
1	0.9–1.0	55–90	Высокая энтропия, двукратное рассеяние
2	0.9–1.0	40–55	Высокая энтропия, дипольное рассеяние
3	0.9–1.0	0–40	Высокая энтропия, поверхностное рассеяние
4	0.5–0.9	50–90	Средняя энтропия, двукратное рассеяние
5	0.5–0.9	40–50	Средняя энтропия, объемное рассеяние
6	0.5–0.9	0–40	Средняя энтропия, поверхностное рассеяние
7	0–0.5	47.5–90	Низкая энтропия, двукратное рассеяние
8	0–0.5	42.5–47.5	Низкая энтропия, дипольное рассеяние
9	0–0.5	0–42.5	Низкая энтропия, поверхностное рассеяние

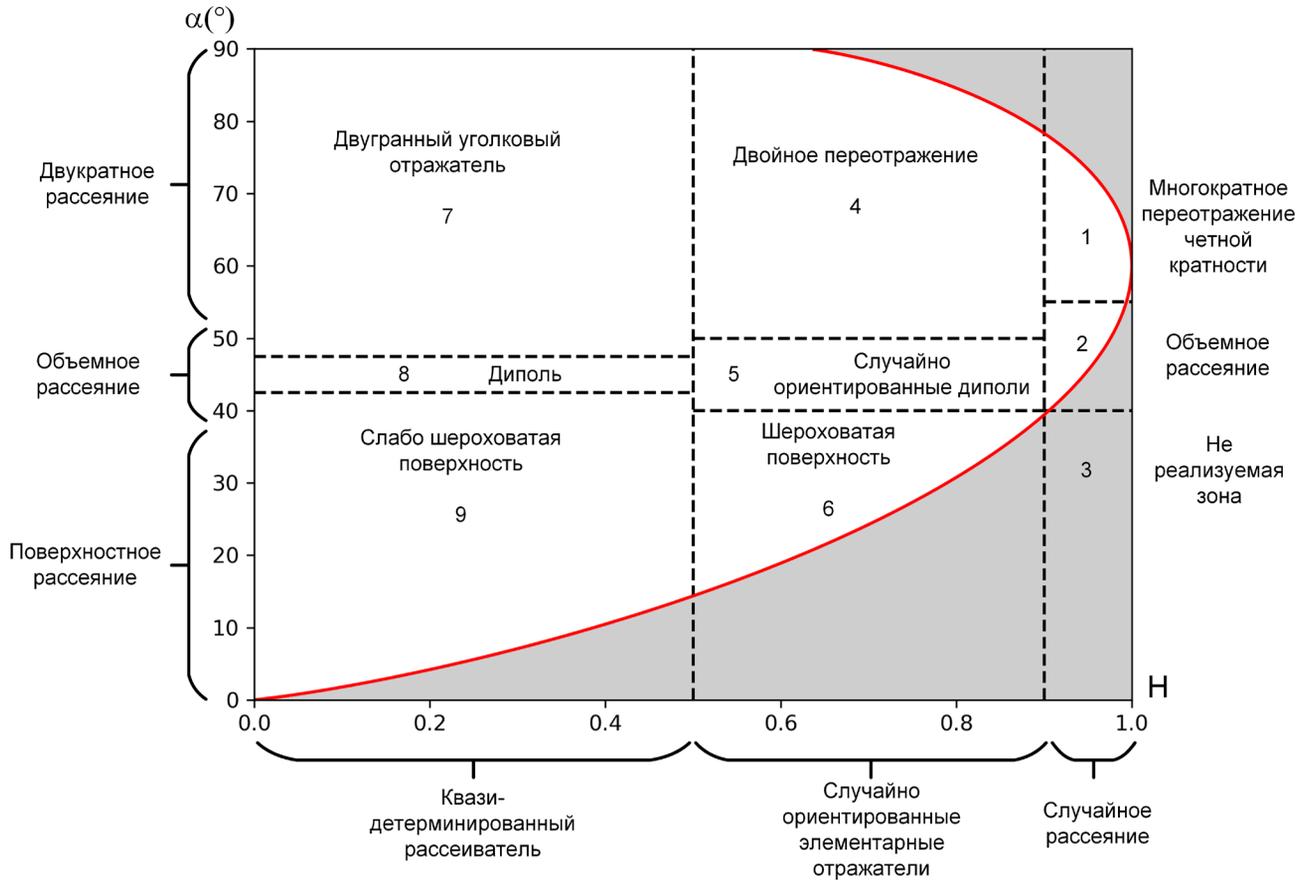


Рис. 1. Расположение зон с различными механизмами рассеяния на плоскости  $H$ - $\alpha$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕКОМПОЗИЦИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение *декомпозиции Фримана–Дурдена*. На рис. 2 показаны ортотрансформированные изображения параметров декомпозиции Фримана–Дурдена по поляризметрическим данным ALOS-2 PALSAR-2 за 28 ноября 2018 г. — до события, связанного с оползнем, и 12 декабря 2018 г. — после обрушения склона сопки. Вклады механизмов рассеяния соответствуют яркости RGB-каналов псевдоцветового синтетического изображения: двойное отражение передано красным цветом, объемное рассеяние — зеленым, поверхностное — синим.

Преобладание оттенков красного свидетельствует о наличии двукратного отражения, это характерно для редкого леса со стволами, толщина которых соизмерима с длиной волны, а также для обрывистых берегов и структур, имеющих вертикальные грани. Объемное рассеяние является доминирующим в отражении от совокупности ветвей крон деревьев лесного покрова, однако в лесу также присутствуют структуры с двукратным (поверхность+ствол дерева)

механизмом рассеяния. Поверхностное рассеяние (синий цвет) и зеркальное отражение от гладкой поверхности (темный тон) отмечается на водной поверхности реки Буря в период времени до ледостава и схода оползня. Различные оттенки голубого цвета приходятся на относительно ровные участки, мелкомасштабная шероховатость которых в основном меньше длины волны. Белый цвет означает равный вклад всех трех компонент.

Рассмотрим динамику компонент разложения Фримана–Дурдена по следующим участкам, показанным на рис. 3:

- участок 1 — насыпь из оползневых масс в русле реки по состоянию на 12 декабря 2018 г;
- участок 2 — зона ударного воздействия водно-ледового «цунами»;
- участок 3 — поверхность р. Буря (вода — 28 ноября 2018 г., ледовый покров — 12 декабря 2018 г.);
- участок 4 — зона обрушения склона сопки.

Особенностью данного оползня явилось то, что порядка 18 млн. м<sup>3</sup> оползневых масс (Захарова и др., 2019) оказались в русле реки

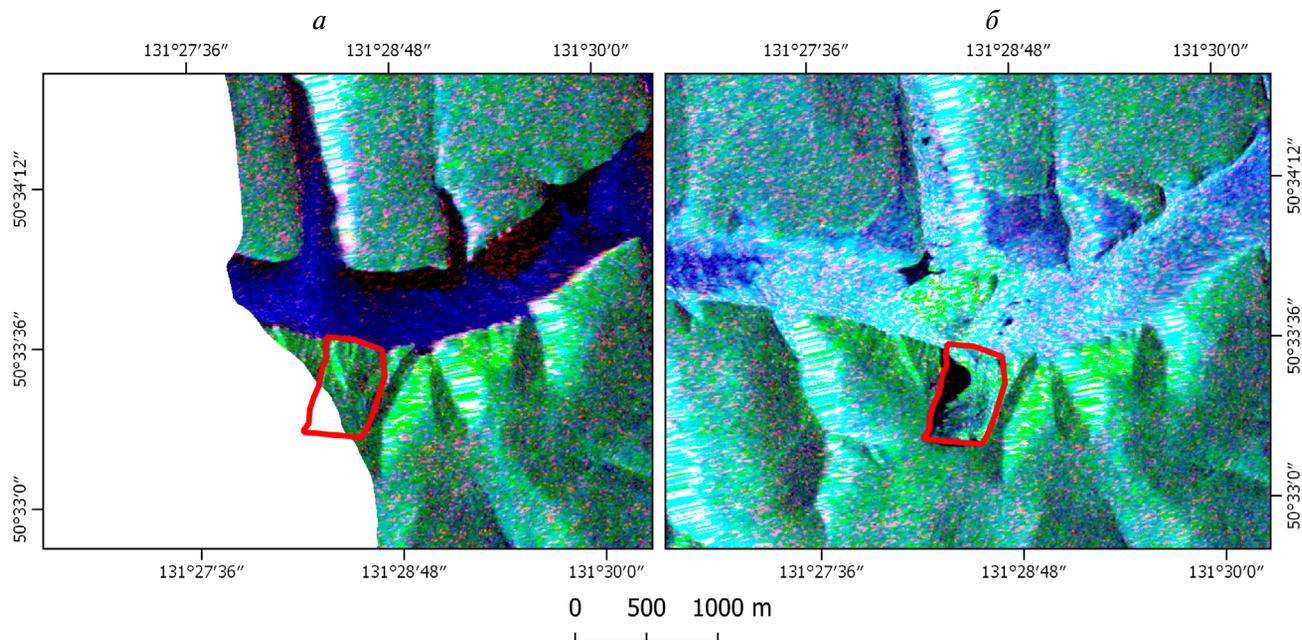


Рис. 2. Декомпозиция Фримана–Дурдена: а — данные от 28 ноября 2018 г. (до события), б — 12 декабря 2018 г. (после события).

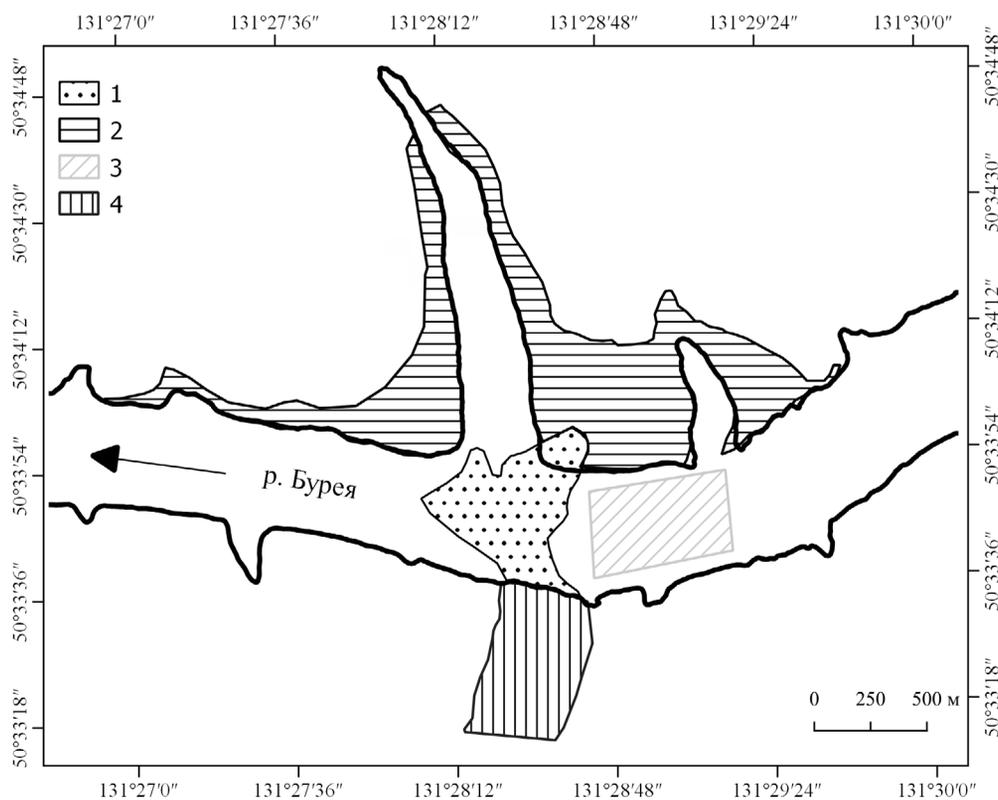


Рис. 3. Схема зоны обрушения склона.

и сформировали насыпь, перегородившую ее (участок 1).

Для количественной оценки изменения отражательных характеристик в таблице 2 пред-

ставлены процентные соотношения вклада каждой компоненты в обратное радарное рассеяние до и после обрушения склона сопки. Так, для контура 1, захватывающего часть береговой зоны

до обрушения, характерно изменение доминирующего физического механизма обратного радарного рассеяния.

Анализ табл. 2 показывает, что до события, связанного с оползнем, т.е. 28 ноября 2018 г., в обратном рассеянии присутствует 49.7% однократного рассеяния, от «шероховатой» поверхности воды в реке и 45.1% объемного рассеяния. После обрушения, т.е. 12 декабря 2018 г., объемное рассеяние поверхностью надводной части оползня стало составлять 62.1% при 36.3% однократного рассеяния. Подобное соотношение указывает на значительную деполяризацию, что может быть связано с переотражением радиолокационного эхосигнала от нагромождения случайно ориентированных крупных и небольших камней, наряду с островками уцелевшей древесной растительности.

Горизонтально заштрихованный участок 2 соответствует фрагменту земной поверхности, которая до возникновения оползня была покрыта лесной растительностью, что согласуется с фактом объемного рассеяния (58.5%) на этом участке по данным радарной поляриметрии за 28 ноября 2018 г. После крупномасштабного обрушения части прибрежной сопки и возникновения водно-ледового «цунами» доминировавший ранее механизм объемного рассеяния уступил однократному рассеянию (60.5%). Подобное изменение доминирующего механизма рассеяния свидетельствует об изменении типа земной поверхности — лесная растительность была полностью смыта волной «цунами».

Участок 3 соответствует водно-ледовому покрову на реке, для которого также были рассчитаны процентные соотношения составляющих трехкомпонентного преобразования. Для этого участка отмечается незначительное изменение поверхностного диффузного рассеяния (с 59.4% до 59.6%) при увеличении на 7% объемного механизма рассеяния (с 31.7% до 38.5%) и уменьшении на эту же величину двукратного рассеяния (с 8.9% до 1.9%). Последнее может означать переход от неоднородностей ветрового волнения

водной поверхности реки 28.11.2018 г., для которых в некоторой степени характерно двукратное отражение, к случайно ориентированным линейным отражателям (обломки деревьев, растрескавшийся лед) на поверхности ледового покрова.

Участок 4 до события, связанного с оползнем, был представлен лесным покровом с соответствующим доминированием компоненты объемного рассеяния (84.1%). После схода оползня, несмотря на отсутствие деревьев, объемное рассеяние становится меньше на 13%, но остается доминирующим. По аналогии с участком 1 подобный эффект можно интерпретировать наличием хаотично ориентированных, а также случайно расположенных в пространстве рассеивателей (мелкомасштабные неоднородности рельефа, груды деревьев), действующих подобно объемным неоднородностям. Увеличение на величину более чем 13% поверхностного рассеяния означает появление после схода оползня шероховатых поверхностей с неровностями порядка длины радиоволны.

Отметим, что более наглядную дополнительную информацию в виде цветных изображений можно найти на веб-странице (Оползень на р. Бурея, 2019) в слое «Поляриметрический композит».

**Декомпозиция  $H$ - $\alpha$ .** На рис. 4 показаны результаты декомпозиции механизмов рассеяния на плоскости  $H$ - $\alpha$ , построенные по методу Клауда–Потье для различных тестовых участков до и после схода оползня.

Метод Клауда–Потье позволяет выявлять основной механизм рассеяния, который может относиться к одному из девяти типов (см. табл. 1). Типы выделяются в соответствии со значениями параметрического угла  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $40^\circ$ – $42^\circ$  соответствуют поверхностному типу рассеяния, от  $40^\circ$ – $42^\circ$  до  $50^\circ$ – $55^\circ$  — дипольному рассеянию, выше  $55^\circ$  — двукратному переотражению. Поверхностное рассеяние подразделяется на два типа, с высокой и умеренной энтропией. На местности это, как правило, отражает уровень мелкомасштабной шероховатости отражающей поверхности.

**Таблица 2.** Распределение компонент преобразования Фримана–Дурдена до (28.11.2018 г.) и после схода оползня (12.12.2018 г.)

Номер участка	28.11.2018 г.			12.12.2018 г.		
	$P_d, \%$	$P_v, \%$	$P_s, \%$	$P_d, \%$	$P_v, \%$	$P_s, \%$
Участок 1	5.2	45.1	49.7	1.6	62.1	36.3
Участок 2	2.8	58.5	38.7	1.7	37.8	60.5
Участок 3	8.9	31.7	59.4	1.9	38.5	59.6
Участок 4	2.6	84.1	13.3	2.1	71.2	26.7

Дипольное рассеяние, соответствующее в разложении Фримана–Дурдена объемному типу рассеяния, подразделяется на три типа (с низкой, умеренной и высокой энтропией). Аналогичным образом подразделяется на три типа по уровню энтропии механизм двукратного рассеяния.

Результаты, приведенные на рис. 4, показывают, что сход оползня в той или иной степени изменил значения энтропии  $H$  и угла  $\alpha$ , однако на различных участках эти изменения носят разный характер. На участках 1 и 3 после схода оползня значения  $H$  и  $\alpha$  стали занимать заметно более компактную область. На всех участках либо энтропия  $H$ , либо значения  $\alpha$  уменьшились после схода оползня, что свидетельствует о тенденции сглаживания отражающей поверхности. Проанализируем изменения на каждом участке отдельно.

Участок 1 представлял собой до оползня водную поверхность реки с небольшим участком лесистого берега, а после — непосредственно

поверхность оползневого грунта, перегородившего русло реки. По рис. 4 видно, что на этом участке после события, связанного со сходом оползня, произошло уменьшение значений энтропии  $H$  с одновременным уменьшением  $\alpha$ . Так, значения  $H$  до оползня находились в диапазоне 0.2–0.95, а после его схода стали находиться в диапазоне 0.4–0.95, значения  $\alpha$  соответственно были в диапазоне 15°–60° и после оползня приняли значение 12°–50°.

В соответствии с сегментацией плоскости  $H$ - $\alpha$  на девять зон (см. рис. 1) получаем, что до оползня параметры  $H$  и  $\alpha$  располагались в основном в зонах 6 и 9, характерных для поверхностного рассеяния, как и следовало ожидать для водной поверхности. Однако, часть точек находится в зонах 2, 4 и 5, характерных для многократного (объемного) рассеяния, присущего растительности. По-видимому, это можно объяснить сильным ветровым волнением водной поверхности в момент съемки, а также фрагментом

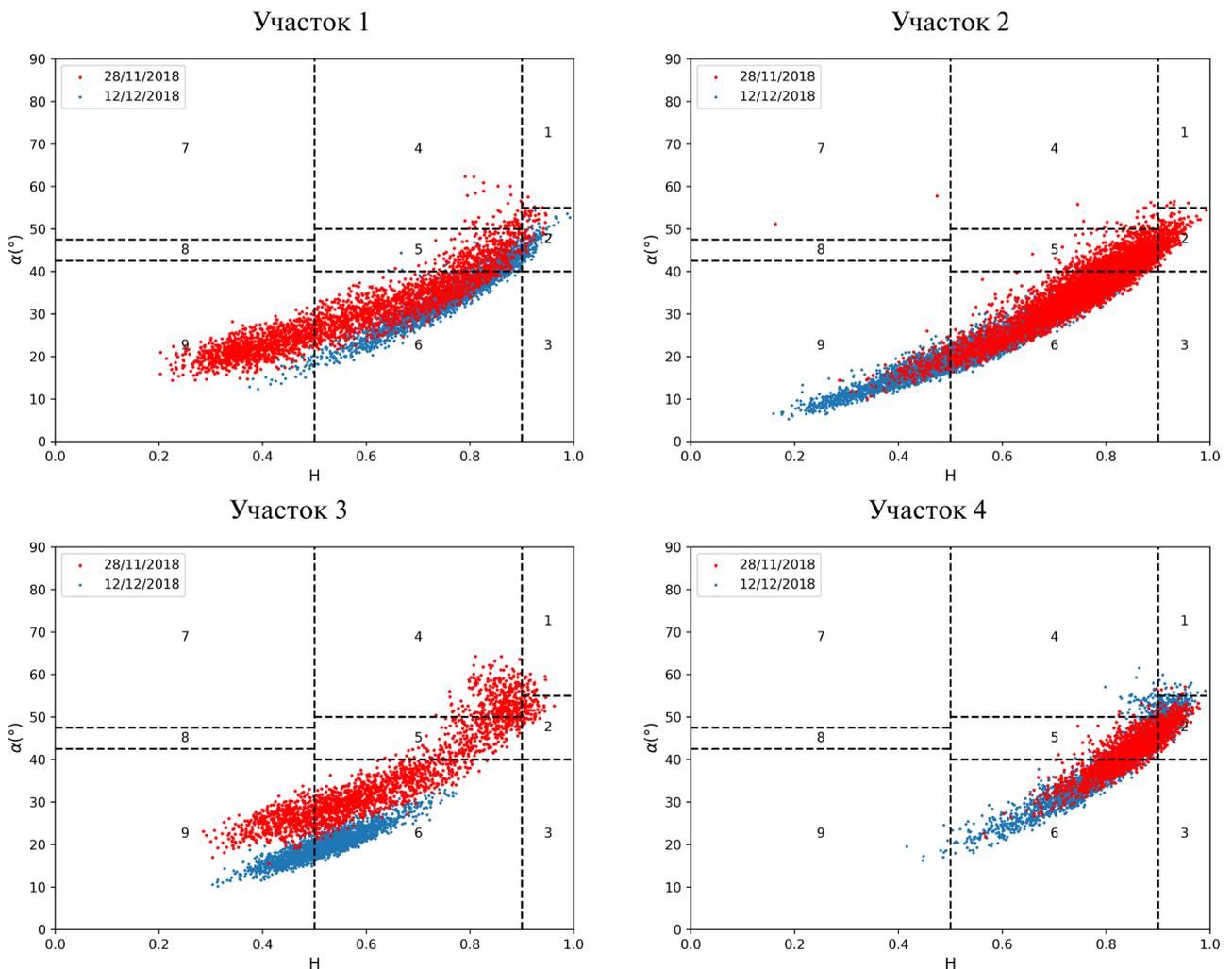


Рис. 4. Результаты  $H$ - $\alpha$  декомпозиции: до схода оползня — красный цвет и после события — синий цвет.

противоположного оползнию берега, попавшим в границы участка 1 благодаря тому, что он был засыпан сошедшим грунтом. После события участок 1 стал представлять собой поверхность оползня, сформированную грунтом и обломками каменной породы различного размера вперемешку с поваленными деревьями. Результаты декомпозиции показывают, что в этом случае брэгговское рассеяние практически исчезает, и большая часть эхосигнала приходит от крупномасштабных неровностей, которые также формируют многократное рассеяние, характерное для зон сегментации 2 и 5.

Участок 2 соответствует исходно пологому берегу с лесным покровом, который был смыт водно-ледовой волной типа «цунами». Из результатов классификации  $H$ - $\alpha$  следует, что рассеяние поверхностью участка 2 — это поверхностное рассеяние (зоны 6 и 9) и рассеяние от растительности (зоны 5 и 2) до оползня, после оползня рассеяние носит в основном поверхностный характер с увеличением доли брэгговского рассеяния.

Участок 3 на поверхности реки свободен от влияния оползня. Различие условий радарных съемок до и после оползня заключается в том, что в день первый съемки река еще не замерзла, а во второй день установился ледовый покров. Из данных, приведенных на рис. 4, следует, что области значений  $H$  и  $\alpha$  на водной поверхности и ледовом покрове практически не пересекаются. В случае водной поверхности попадание в области многократного рассеяния 2, 4 и 5 говорит о вероятно высокой степени взволнованности поверхности реки в период съемки, как и для участка 1. Обратное рассеяние ледового покрова после ледостава — это однократное, поверхностное рассеяние.

Участок 4 представляет собой собственно оползневый склон лесистого берега реки до схода оползневых масс, а также оползневый цирк, образовавшийся впоследствии. Следует отметить, что верхняя (правая) часть облака точек, попадающая в зоны 2 и 5, и характеризующая объемное рассеяние, практически не изменилась. Это свидетельствует о том, что после схода оползня осталось много поваленных деревьев, и присутствуют в большом количестве грунт и обломки скальной породы, которые определяют характер многократного рассеяния аналогично кронам деревьев в лесу. Из рис. 4 следует, что после схода оползня, как и следовало ожидать, увеличилась доля поверхностного рассеяния.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов декомпозиций Фримана—Дурдена и Клауда—Потье продемонстрировало их общее согласие, однако наблюдаются и определенные различия. Они проявляются, например, при сравнении механизмов рассеяния, на поверхности реки (участок 3). Так, величины, характеризующие механизмы рассеяния на основе преобразования Фримана—Дурдена до оползня (водная поверхность реки) и после (ледовый покров) достаточно близки — составляющая поверхностного рассеяния практически не изменилась: была 59.4%, стала 59.6%. Объемное рассеяние занимало 51.7%, стало составлять 58.5%. Наиболее сильно изменился вклад двойного уголкового рассеяния: он уменьшился с 8.9% до 1.9%.

Анализ результатов классификации по методу Клауда—Потье показывает более существенные изменения механизмов рассеяния: после схода оползня заметно уменьшились как энтропия  $H$ , так и значения угла  $\alpha$ . Если до оползня наблюдалась достаточно заметная доля объемного (многократного рассеяния), то после оползня рассеяние стало чисто поверхностным.

В целом, проведенный анализ показывает, что методы поляриметрической декомпозиции являются эффективными и позволяют достаточно уверенно выявлять изменения механизмов рассеяния, происходящих в результате оползней и тем самым определять различные зоны, формирующиеся при сходе оползней.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы признательны японскому аэрокосмическому агентству JAXA за данные радара ALOS-2 PALSAR-2, предоставленные в рамках проектов ALOS-2 RA-6 (PI 3402 и PI 3092). Работа выполнена в рамках государственных заданий ИФМ СО РАН, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и НИИ «АЭРОКОСМОС».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акоян 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. doi: 10.7868/S0002333717010021
- Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.

- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // Доклады академии наук. 2016а. Т. 466. № 5. С. 598–601. doi: 10.7868/S0869565216050170
- 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 // Доклады академии наук. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- 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 градиентов атмосферного давления // Доклады академии наук. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
- 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. 2016б. № 1. С.120–132. doi: 10.7868/S000233371601004X
- Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И. и др. Долговременный мониторинг оползневой процесса на берегу реки Бурея по данным интерферометрической съемки радаров L-диапазона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. В печати.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений // Доклады Академии наук. 2005. Том 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линеamentов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Потапов И.И., Солдатов В.Ю. Природные катастрофы и окружающая среда // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2012. № 1. С. 3–160.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А. О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // Доклады Академии наук. 2008а. Т. 422. № 2. С. 244–249.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Катрина // Исследование Земли из космоса. 2008б. № 6. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Старченков С.А. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008а. № 5. С. 9–14.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008б. № 6. С. 64–73.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Оценка пространственной анизотропии неоднородностей лесной растительности при различных азимутальных углах радарного поляриметрического зондирования // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. С. 92–103. doi: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019392-103>
- Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
- Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Гусев М.А. и др. Базовые продукты зондирования земли космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой // Исследование Земли из космоса. 2014. № 5. С. 83–91.
- Дубина Б.А., Шамов Б.Б., Плотников Б.Б. Катастрофическое наводнение в Приморье в августе 2018 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 253–256.
- Захаров А.И., Захарова Л.Н. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурея по данным интерферометрической съемки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273–277
- Захаров А.И., Захарова Л.Н., Красногорский М.Г. Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголковых отражателей // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 80–92.
- Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Либроком, 2012. 248 с.
- Захарова Л.Н., Захаров А.И., Митник Л.М. Первые результаты радиолокационного мониторинга последствий оползня на реке Бурея по данным Sentinel-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 69–74
- Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Амельченко Ю.А. и др. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Бурея 11 декабря 2018 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 266–271. URL: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/sb2018t7/266-271.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2018t7/266-271.pdf) (дата обращения 08.02.2019).

- Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И. и др. Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи. // Физика земли. 2014. № 4. С. 120–130.
- Оползень на р. Буря. [Электронный ресурс]. URL: <http://omdoki.nextgis.com/resource/103/display> (дата обращения 01.07.2019).
- Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N., Vykov M.E., Dmitriev A.V., and 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 // Journal of Applied Remote Sensing. 2016. V. 10. № 1. P. 016006–1–016006–12. <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.10.016006>
- Cloude S.R. Polarisation: applications in remote sensing. New York: Oxford University Press, 2010. 453 p.
- Cloude S.R., Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1996. V. 34. № 2, P. 498–518. doi: 10.1109/36.485127
- Cloude S.R., Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1997. V. 35. № 1. P. 68–78. doi: 10.1109/36.551935
- Czuchlewski K.R., Weissel J.K., Kim Y. Polarimetric synthetic aperture radar study of the Tsaoling landslide generated by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan // Journal of Geophysical Res. 2003. V. 108. № F1, 6006. doi:10.1029/2003JF000037
- Ferro-Famil L., Pottier E., Jong-Sen Lee. Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. № 11. P. 2332–2342. doi: 10.1109/36.964969
- Freeman A., Durden S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1998. V. 36. № 3. P. 963–973. doi: 10.1109/36.673687
- Lee J.S., Grunes M.R., de Grandi G. Polarimetric SAR Speckle filtering and its implication for classification // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1999. V. 37. № 5. P. 2363–2373. doi: 10.1109/36.789635
- Lee J.-S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC Press, 2009. 414 p.
- Li N., Wang R., Deng Y., Liu Y., Li B., Wang C., Balz T. Unsupervised polarimetric synthetic aperture radar classification of large-scale landslides caused by Wenchuan earthquake in hue-saturation-intensity color space // Journal of Applied Remote Sensing. 2014a. V. 8(1). 083595–1–083595–8. doi: 10.1117/1.JRS.8.083595
- Li N., Wang R., Deng Y., Liu Y., Wang C., Balz T., Li B. Polarimetric Response of Landslides at X-Band Following the Wenchuan Earthquake // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014b. V. 11. № 10. P. 1722–1726. doi: 10.1109/LGRS.2014.2306820
- Luo S., Tong L., Chen Y., Tan L. Landslides identification based on polarimetric decomposition techniques using Radarsat-2 polarimetric images // International Journal of Remote Sensing. 2016. V. 37:12. P. 2831–2843. doi: 10.1080/01431161.2015.1041620
- Plank S., Twele A., Martinis S. Landslide Mapping in Vegetated Areas Using Change Detection Based on Optical and Polarimetric SAR Data // Remote Sens. 2016. V. 8. № 4. P. 307; doi:10.3390/rs8040307
- PolSARpro [Электронный ресурс]. URL: <https://earth.esa.int/web/polsarpro> (дата обращения: 01.07.2019)
- Shibayama T., Yamaguchi Y., Yamada H. Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle // Remote Sens. 2015. V. 7. № 11. P. 15424–15442; doi:10.3390/rs71115424
- Shimada M., Watanabe M., Kawano N., Ohki M., Motooka T., Wada Y. Detecting Mountainous Landslides by SAR Polarimetry: A Comparative Study Using Pi-SAR-L2 and X-band SARs // Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan. 2014. V. 12, № ists29, P. Pn\_9-Pn\_15. doi: 10.2322/tastj.12.Pn\_9
- Shirzaei M., Bürgmann R., Fielding E.J. Applicability of Sentinel-1 Terrain Observation by Progressive Scans multitemporal interferometry for monitoring slow ground motions in the San Francisco Bay Area. // Geophys. Res. Lett. 2017. № 44. P. 2733–2742. doi:10.1002/2017GL072663
- Wang C., Mao X., and Wang Q. Landslide Displacement Monitoring by a Fully Polarimetric SAR Offset Tracking Method // Remote Sens. 2016. V. 8. № 8. P. 624. doi:10.3390/rs8080624
- Watanabe M., Thapa R.B., Shimada M. Pi-SAR-L2 Observation of the Landslide Caused by Typhoon Wipha on Izu Oshima Island // Remote Sens. 2016. V. 8. № 4. P. 282. doi:10.3390/rs8040282
- Watanabe M., Yonezawa C., Iisaka J., Sato M. ALOS/PALSAR full polarimetric observations of the Iwate–Miyagi Nairiku earthquake of 2008. // International Journal of Remote Sensing. 2012. V. 33:4. P. 1234–1245. doi: 10.1080/01431161.2011.554453
- Yamaguchi Y. et al. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition // IEEE Trans Geosci. Remote Sens. 2005. T. 43. № 8. C. 1699–1706. doi: 10.1109/TGRS.2005.852084
- Yonezawa C., Watanabe M., Saito G. Polarimetric Decomposition Analysis of ALOS PALSAR Observation Data before and after a Landslide Event // Remote Sens. 2012. V. 4. № 8. P. 2314–2328. doi:10.3390/rs4082314

## Using Radar Polarimetry to Monitor Changes in Backscattering Mechanisms in Landslide Zones for the Case Study of the Bureya River Bank Collapse

V. G. Bondur<sup>1</sup>, T. N. Chimitdorzhiev<sup>2</sup>, A. V. Dmitriev<sup>2</sup>, P. N. Dagurov<sup>2</sup>, A. I. Zakharov<sup>3</sup>,  
L. N. Zakharova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Research Institute of Aerospace Monitoring Aerocosmos, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

<sup>3</sup> *V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino, Russia*

The possibilities of radar polarimetry methods for identification of landslide zones are analyzed here. The fact of transformation of the dominant scattering type by the reflecting surface was used as a key feature of the landslide zone. ALOS-2 PALSAR-2 polarimetric data were processed using the Freeman–Durden and Cloude–Pottier decompositions for the four test sites selected in the area of a landslide caused by the Bureya river bank collapse. The decomposition results are consistent with each other in general, however, some areas show significant differences due to the specifics of the basic model provisions. It is shown that before the landslide event on the landslide area there were three main mechanisms of radar signal scattering: surface, volume, and double scattering. After the collapse, this area is characterized by a single scattering from the surface with large-scale irregularities and without vegetation. So, the landslide area can be confidently recognized. The considerable potential of using the radar polarimetry method for remote diagnostics of the effects of landslide phenomena has been demonstrated.

**Keywords:** remote sensing, radar polarimetry, landslide, scattering types, decomposition of polarimetric signals

### 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. Vol. 53. № 1. P. 32–51. doi: 10.1134/S1069351317010025
- Bondur V.G.* Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. Vol. 47. № 9. P. 1007–1018. doi: 10.1134/S0001433811090039
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitel'nosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008a. № 5. P. 9–14. (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Distantionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi metodami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008b. № 6. P. 64–73. (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N.* Otsenka prostranstvennoy anizotropii neodnorodnostey lesnoy rastitelnosti pri razlichnykh azimutalnykh uglakh radarnogo polyarimetricheskogo zondirovaniya [Spatial anisotropy assessment of the forest vegetation heterogeneity at various azimuth angles of the radar polarimetric sensing] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 3. P. 92–103. doi: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019392-103>
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B.* Large scale interaction of seismically active tectonic provinces: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*, 2016a, Vol. 466, No. 2, pp. 183–186. doi: 10.1134/S1028334X16020100
- 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. Vol. 430. Part 1. P. 147–150. doi: 10.1134/S1028334X10010320
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblou 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. Vol. 414. № 4. P. 666–669. doi: 10.1134/S1028334X07040381
- 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*. 2016b. Vol. 52. № 1. pp. 117–128. doi 10.1134/S1069351316010043
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Potapov I.I., Soldatov V.Ju.* Prirodnye katastrofy i okruzhajushhaja sreda [Natural disasters and the environment] // *Problemy okruzhajushhej sredy i prirodnykh resursov*. 2012. № 1. P. 3–160. (In Russian).
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P.* Monitoring i prognozirovanie prirodnykh katastrof [Monitoring and forecasting of the natural disasters]. M: Nauchny mir, 2009. 692 p.
- 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*. 2008a. Vol. 422. № 7. P. 1124–1128. doi: 10.1134/S1028334X08070283
- Bondur V.G., Pulinets S.A., Uzunov D.* Vozdeystvie krupnomasshtabnykh atmosferynykh vikhrevykh protsessov na ionosferu na primere uragana Katrina [Ionospheric effect of large-scale atmospheric vortex by the example of hurricane

- Katrina] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2008b. № 6. P. 3–11. (In Russian).
- Bondur V.G., Smirnov V.M.* Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // *Doklady Earth Sciences*. 2005. Vol. 403. № 5. P. 736–740.
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2001. № 3. S. 118–143. (in Russian)
- Bondur V.G., Zakharova L.N., Zakharov A.I. et al.* Dolgovremennyy monitoring opolznevoogo processa na beregu reki Bureja po dannym interferometricheskoy s'jomki radarov L-diapazona [Long-term monitoring of landslide process on the Bureya riverbank according to interferometric L-band radar data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019 (in press).
- Bondur V.G., Zverev A.T.* A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences*, 2005. Vol.402. № 4. P. 561–567.
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registriruemykh na kosmicheskikh izobrazheniyakh pri monitoringe seysmopasnykh territoriy [Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 1. P. 47–56 (In Russian).
- Chimitorzhiev T.N., Dagurov P.N., Bykov M.E., Dmitriev A.V., and Kirbizhekova I.I.* Comparison of ALOS PALSAR interferometry and field geodetic leveling for marshy soil thaw/freezing monitoring, case study from the Baikal lake region, Russia // *Journal of Applied Remote Sensing*. 2016. V. 10. № 1. P. 016006–1–016006–12. <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.10.016006>
- Cloude S.R.* Polarisation: applications in remote sensing. New York: Oxford University Press, 2010. 453 p.
- Cloude S.R., Pottier E.* A review of target decomposition theorems in radar polarimetry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1996. V. 34. № 2, P. 498–518. doi: 10.1109/36.485127
- Cloude S.R., Pottier E.* An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997. V. 35. № 1. P. 68–78. doi: 10.1109/36.551935
- Czuchlewski K.R., Weissel J.K., Kim Y.* Polarimetric synthetic aperture radar study of the Tsaoling landslide generated by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan // *Journal of Geophysical Res.* 2003. V. 108. № F1, 6006. doi:10.1029/2003JF000037
- Dmitriev A.V., Chimitorzhiev T.N., Gusev M.A. et al.* Bazovye produkty zondirovaniya zemli kosmicheskimi radiolokatorami s sintezirovannoy aperturoj [Basic products of earth imaging by space radars with synthesized aperture] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2014. № 5. P. 83–91. (In Russian)
- Dubina B.A., Shamov B.B., Plotnikov B.B.* Katastroficheskoe navodnenie v Primor'e v avguste 2018g [Catastrophic flood in Primorye in August 2018] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15. № 5. P. 253–256. (In Russian)
- Ferro-Famil L., Pottier E., Jong-Sen Lee.* Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001. V. 39. № 11. P. 2332–2342. doi: 10.1109/36.964969
- Freeman A., Durden S.L.* A three-component scattering model for polarimetric SAR data // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998. V. 36. № 3. P. 963–973. doi: 10.1109/36.673687
- Kramareva L.S., Lupjan E.A., Amel'chenko Ju.A. et al.* Nabljudenie zony obrusheniya sopki v rajone reki Bureja 11 dekabrya 2018 goda [Observation of the hill collapse zone near the Bureya River on December 11, 2018] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. T. 15. № 7. S. 266–271. (In Russian)
- Landslide on the river Bureya. URL: <http://omdoki.nextgis.com/resource/103/display>
- Lee J.S., Grunes M.R., de Grandi G.* Polarimetric SAR Speckle filtering and its implication for classification // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999. V. 37. № 5. P. 2363–2373. doi: 10.1109/36.789635
- Lee J.-S., Pottier E.* Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC Press, 2009. 414 p.
- Li N., Wang R., Deng Y., Liu Y., Li B., Wang C., Balz T.* Unsupervised polarimetric synthetic aperture radar classification of large-scale landslides caused by Wenchuan earthquake in hue-saturation-intensity color space // *Journal of Applied Remote Sensing*. 2014a. V. 8. № 1. 083595–1–083595–8. doi: 10.1117/1.JRS.8.083595
- Li N., Wang R., Deng Y., Liu Y., Wang C., Balz T., Li B.* Polarimetric Response of Landslides at X-Band Following the Wenchuan Earthquake // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014b. V. 11. № 10. P. 1722–1726. doi: 10.1109/LGRS.2014.2306820
- Luo S., Tong L., Chen Y., Tan L.* Landslides identification based on polarimetric decomposition techniques using Radarsat-2 polarimetric images // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. V. 37:12. P. 2831–2843. doi: 10.1080/01431161.2015.1041620
- Mihajlov V.O., Kiseleva E.A., Smol'janinova E.I. et al.* Nekotorye problemy monitoringa opolznevykh processov s ispol'zovaniem sputnikovyykh radarnyykh snimkov s razlichnoy dlinoj volny na primere dvuh opolznevykh sklonov v rajone Bol'shogo Sochi [Some problems of landslide processes monitoring using satellite radar images with different wavelengths on the example of two landslides in the Great Sochi] // *Fizika zemli*. 2014. № 4. S. 120–130. (In Russian)
- Plank S., Twele A., Martinis S.* Landslide Mapping in Vegetated Areas Using Change Detection Based on Optical and Polarimetric SAR Data // *Remote Sens.* 2016. V. 8. № 4. P. 307; doi:10.3390/rs8040307
- PolSARpro. URL: <https://earth.esa.int/web/polsarpro>
- Shibayama T., Yamaguchi Y., Yamada H.* Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle // *Remote*

- Sens. 2015. V. 7. № 11. P. 15424–15442; doi:10.3390/rs71115424
- Shimada M., Watanabe M., Kawano N., Ohki M., Motooka T., Wada Y.* Detecting Mountainous Landslides by SAR Polarimetry: A Comparative Study Using Pi-SAR-L2 and X-band SARs // *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan.* 2014. V. 12. № ists29, P. Pn\_9-Pn\_15. doi: 10.2322/tastj.12.Pn\_9
- Shirzaei M., Bürgmann R., Fielding E.J.* Applicability of Sentinel-1 Terrain Observation by Progressive Scans multitemporal interferometry for monitoring slow ground motions in the San Francisco Bay Area. // *Geophys. Res. Lett.* 2017. № 44. P. 2733–2742. doi:10.1002/2017GL072663
- Verba V.S., Neronskij L.B., Osipov I.G., Turuk V.Je.* Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Space-based radar systems for earth observation]. M.: Radiotekhnika, 2010. 680 p. (In Russian)
- Wang C., Mao X., and Wang Q.* Landslide Displacement Monitoring by a Fully Polarimetric SAR Offset Tracking Method // *Remote Sens.* 2016. V. 8. № 8. P. 624. doi:10.3390/rs8080624
- Watanabe M., Thapa R.B., Shimada M.* Pi-SAR-L2 Observation of the Landslide Caused by Typhoon Wipha on Izu Oshima Island // *Remote Sens.* 2016. V. 8. № 4. P. 282. doi:10.3390/rs8040282
- Watanabe M., Yonezawa C., Iisaka J., Sato M.* ALOS/PALSAR full polarimetric observations of the Iwate–Miyagi Nairiku earthquake of 2008. // *International Journal of Remote Sensing.* 2012. V. 33:4. P. 1234–1245. doi: 10.1080/01431161.2011.554453
- Yamaguchi Y. et al.* Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition // *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.* 2005. V. 43. № 8. P. 1699–1706. doi: 10.1109/TGRS.2005.852084
- Yonezawa C., Watanabe M., Saito G.* Polarimetric Decomposition Analysis of ALOS PALSAR Observation Data before and after a Landslide Event // *Remote Sens.* 2012. V. 4. № 8. P. 2314–2328. doi:10.3390/rs4082314
- Zakharov A.I., Jakovlev O.I., Smirnov V.M.* Sputnikovyy monitoring Zemli: Radiolokacionnoe zondirovanie poverhnosti [Satellite monitoring of the Earth: Radar imaging of the surface]. M.: Librokom, 2012. 248 p. (In Russian)
- Zakharov A.I., Zakharova L.N., Krasnogorskiy M.G.* Monitoring opolznevoj aktivnosti metodami radarnoj interferometrii s pomoshh'ju trehgrannyh ugolkovyh otrazhatelej [Landslide activity monitoring by radar interferometry methods using trihedral corner reflectors] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2018. № 3. P. 80–92. (In Russian)
- Zakharova L.N., Zakharov A.I.* Nabljudenie dinamiki zony opolznja na reke Bureja po dannym interferometricheskoj sjomki Sentinel-1 v 2017–2018 gg [Interferometric observation of landslide area dynamics on the Bureya River by means of Sentinel-1 radar data in 2017–2018] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa,* 2019. V. 16. № 2. P. 273–277. (In Russian)
- Zakharova L.N., Zakharov A.I., Mitnik L.M.* Pervye rezul'taty radiolokatsionnogo monitoringa posledstviu opolznja na reke Bureya po dannym Sentinel-1 [First Results of the Assessment of the Landslide Consequences on the Bureya Riverbank Using Sentinel-1 Radar Data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa,* 2019. V. 16, № . 2. P. 69–74. (In Russian)