Сезонная изменчивость коэффициента обратного рассеяния по данным Sentinel-1 в применении к исследованию острова Котельный

К. А. Трошко[1,2], Е. А. Балдина[1]

[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*
Москва, 119991, Россия
E-mail: baldina@geogr.msu.ru

[2] *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*
E-mail: troshko_ka@ntsomz.ru

Новая космическая система радиолокационного зондирования Земли Sentinel-1 осуществляет съёмку приполярных районов с высокой повторяемостью, что открывает возможность регулярного мониторинга этих относительно малоизученных и труднодоступных территорий. Большой объём информации, полученной за первые годы работы этой системы, позволяет предварительно оценить информативность разновременных радиолокационных данных для характеристики этих районов. На примере острова Котельный (архипелаг Новосибирские острова) рассматриваются сезонные изменения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР), полученной по разновременным данным радиолокатора С-диапазона, установленного на спутнике Sentinel-1A, за период с ноября 2014 г. по ноябрь 2016 г. Для десяти элементарных площадок, выбранных в пределах типичных ландшафтов острова, получены и проанализированы временные образы УЭПР. Привлечение дополнительной информации о местности (карт, снимков оптического диапазона, сведений о погоде) позволило охарактеризовать основные факторы, влияющие на интенсивность обратного сигнала от разных участков и её изменения в течение двухлетнего периода. Для большинства исследуемых участков наиболее существенные изменения УЭПР связаны с процессами, сопровождающими периоды с устойчивыми отрицательными (промерзание сезонно-талого слоя, выпадение снега) и положительными (таяние снежного покрова и сезонно-талого слоя, развитие растительного покрова) температурами. На относительные различия УЭПР площадок в пределах снимков одного срока в разной степени влияют такие свойства местности, как характер рельефа и его расчленения, грунтов, тип и обилие растительного покрова, заболоченность территории. Хорошая различимость арктических ландшафтов на основе многовременного хода УЭПР делает перспективным использование именно разновременных радиолокационных данных в задаче классификации типов ландшафтов и их картографирования.

Ключевые слова: Арктика, Новосибирские острова, остров Котельный, тундровые ландшафты, многолетняя мерзлота, радиолокационная съёмка Земли, Sentinel-1, разновременные снимки, С-диапазон, удельная эффективная площадь рассеяния, временной образ УЭПР, сезонные изменения

Одобрена к печати: 11.10.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-123-137

Введение

Одним из приоритетных направлений «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» является формирование системы мониторинга состояния окружающей среды, в том числе с использованием средств наблюдения космического базирования. Ввиду того, что арктические районы часто закрыты облаками, а в зимний период года здесь наблюдается полярная ночь, особую значимость для их регулярного наблюдения приобретают материалы разновременных космических радиолокационных съёмок.

Эффективность применения разновременных радиолокационных данных и разнообразных методов их обработки в изучении Арктики успешно доказана на примере различных её районов и направлений мониторинга. Одно из них — экспериментальные исследования временных рядов значений коэффициента обратного рассеяния сигнала разными типами

поверхности и обусловливающих их факторов, в том числе с опорой на материалы детальных наземных обследований (Antonova et al., 2016a, b; Duguay et al., 1999; Park et al., 2010; Pivot, 2012; Sobiech et al., 2012). Другое направление исследований, опирающееся на многократные радиолокационные съёмки, связано с использованием метода дифференциальной интерферометрии, позволяющего осуществлять, например, мониторинг движения ледников (Sharov, Nikolskiy, 2013; Strozzi et al., 2008) и смещений поверхности, обусловленных сезонным оттаиванием и замерзанием сезонно-талого слоя (Lauknes et al., 2013; Liu et al., 2010).

Стоит отметить, что до недавнего времени доступ к радиолокационным данным для научных исследований был весьма ограниченным, в первую очередь ввиду их высокой стоимости. В 2014 и 2016 гг. Европейским космическим агентством были выведены на орбиту два космических аппарата радиолокационного наблюдения в С-диапазоне Sentinel-1A и -1B, к данным которых осуществляется свободный доступ. За первые годы функционирования этой космической системы накоплены внушительные объёмы радиолокационных данных. Временные серии снимков Sentinel-1 уже нашли применение в исследованиях и мониторинге сельскохозяйственной (Мышляков, 2016) и лесной (Родионова, 2016) растительности, в задаче выявления смещений поверхности (Crosetto et al., 2016). В арктическом регионе опробованы возможности применения таких данных для мониторинга морских льдов (Митник, Хазанова, 2015) и движения ледников (Nagler et al., 2015). Исследования же участков арктической суши, лишённых покровного оледенения, практически не проводились. Тем не менее их целесообразность не вызывает сомнения, особенно ввиду заметных климатических изменений и всё возрастающей антропогенной нагрузки на эти территории. На примере одного из островов российского сектора Арктики выполнен анализ значений коэффициента обратного рассеяния, полученного по разновременным данным со спутника Sentinel-1A, и проведено соотнесение этих значений с состоянием поверхности.

Характеристика исследуемой территории

Для исследования выбран один из Новосибирских островов, Котельный, расположенный между 74–76° с. ш. и 137–145° в. д. (*рис. 1*). Интерес к этой территории обусловлен двумя факторами: с одной стороны, с 2013 г. на территории острова восстанавливается военная база с возведением новых построек и активизацией использования территории; с другой — здесь же, наряду с другими островами архипелага, планируется создание государственного природного заказника «Новосибирские острова» (Материалы комплексного..., 2015).

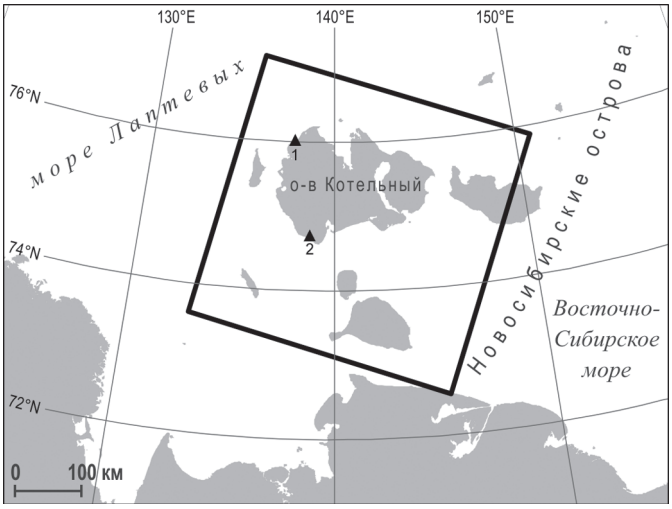

Рис. 1. Остров Котельный (жирной рамкой выделен участок съёмки Sentinel-1A, треугольниками показано расположение метеостанций «Остров Котельный» (1) и «Пролив Санникова» (2), данные с которых использованы в исследовании)

Остров значителен по площади (23,2 тыс. км^2) и состоит из трёх частей, существенно различающихся происхождением, геологией и рельефом, которые исторически получили разные названия: о. Котельный, Земля Бунге и о. Фаддеевский (с запада на восток).

Высокоширотное географическое положение острова определяет господство арктического климата с низкими температурами и малым количеством осадков (130–140 мм) при их неравномерном распределении в течение года (наибольшее количество — в июле и августе); снежный покров держится не менее девяти месяцев, снегопады нередки и в короткий летний период.

Западная часть острова — наиболее возвышенная, в её рельефе выделяются два гипсометрических уровня: прибрежная равнина (средние высоты 20–40 м) и возвышенности с преобладанием плато (80–120 м), отдельные вершины на юге достигают высот более 300 м. Земля Бунге — практически ровная песчаная пустыня с высотами до 6–10 м, в центре которой находится возвышенность Евсекю-Булгуннях с высотами более 10 м, сложенная прочными дочетвертичными породами с признаками эрозионного расчленения, а на юго-востоке — возвышенность Земли Бунге с преимущественно термокарстовым расчленением. Восточная часть (о. Фаддеевский) — расчленённая пологоувалистая аккумулятивно-денудационная равнина со средними высотами 20–30 м, сложенная мёрзлыми рыхлыми отложениями с включениями ископаемого льда. Остров Котельный расположен в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, поэтому для него свойственны разнообразные формы криогенного рельефа.

На островах Котельном и Фаддеевском хорошо развита речная сеть, здесь же распространены озёра. Плоские понижения в пределах низменностей заболочены. Песчаная пустыня Земли Бунге лишена постоянных водотоков, однако в летний период здесь образуются широкие ложбины стока талых вод.

Растительный покров острова достаточно скудный, распределён неравномерно; основными жизненными формами являются кустарнички, многолетние травы, мхи и лишайники, высота растений не превышает 10–15 см, вегетационный период длится не более двух месяцев. Густота растительности во многом зависит от положения участка в рельефе и наличия снежного покрова: в местах, лишённых снега, а также на пустынной песчаной Земле Бунге растительность крайне разрежена или полностью отсутствует. Наиболее богата флора в защищённых речных долинах и аласах (Новосибирские острова, 1963, 1967; Советская Арктика..., 1970).

Относительно невысокое разнообразие ландшафтов острова при их хорошо выраженной сезонной изменчивости, а также наличие литературных и картографических материалов должно позволить определить факторы изменчивости территории, проявляющиеся в изменениях радиолокационного изображения.

Характеристика использованных материалов

Основной вид данных — разновременные радиолокационные снимки с европейского космического аппарата Sentinel-1A. Установленный на спутнике радиолокатор с синтезированной апертурой осуществляет съёмку в четырёх режимах (https://sentinel.esa.int). В исследовании наибольший интерес представляет длинный временной ряд данных, охватывающих территорию всего острова с хорошей повторяемостью, чему соответствует сверхширокозахватный режим съёмки EW. Снимки получены с интервалом, кратным 12 сут, при одинаковых параметрах съёмки (см. след. с.), что позволяет исключить их влияние на величину удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) при сравнении 49 разносезонных изображений.

Отметим, что в работе проанализированы значения УЭПР только в ГГ-поляризации ввиду нескольких причин: 1) на снимках ГВ-поляризации в значительной степени выражены радиометрические искажения, проявляющиеся в виде полос с повышенной яркостью, параллельных направлению движения космического аппарата и направлению визирования; 2) в целом вид графиков многовременного хода УЭПР в ГВ-поляризации во многом повторяет вид таких графиков в ГГ-поляризации, но с более низкими значениями; 3) для некоторых участков в ГВ-поляризации практически не наблюдается вариаций значений УЭПР, поскольку

они ниже порога радиометрической чувствительности системы. Согласно технической документации, радиолокаторы на спутниках Sentinel-1 обеспечивают радиометрическую чувствительность $\leqslant -22$ дБ и радиометрическую точность $3\sigma \leqslant 1$ дБ (Sentinel-1..., 2013).

Характеристика используемых радиолокационных данных

Спутник/съёмочная система	Sentinel-1A/C-band SAR
Режим съёмки	EW — Extra-Wide Swath — сверхширокозахватный
Уровень обработки	GRDM — ground range detected medium resolution — изображение в проекции наклонной дальности со средним уровнем детальности
Пространственный охват	400×400 км
Размер пиксела	40×40 м
Поляризация	согласованная горизонтальная (ГГ), перекрёстная горизонтально-вертикальная (ГВ)
Даты съёмки	29.11.2014–30.11.2016
Время съёмки	21:37 UTC
Угол падения излучения	19,2–46,5° (собственно остров Котельный — в пределах 28,6–42,9°)
Номер витка	105
Направление орбиты	нисходящая

Поскольку вариации яркости на радиолокационных снимках зависят от многих факторов, включая параметры съёмки (длина волны, угол визирования, поляризация сигнала и др.), постоянные и меняющиеся свойства местности, эффективность интерпретации яркостных различий во многом определяется знаниями как особенностей изображённой территории, так и причин и характера возможных изменений, в связи с чем особое значение приобретают дополнительные сведения о местности. Были привлечены картографические источники (топографическая и геологическая карты масштаба 1:200 000, геоморфологическая карта масштаба 1:2 500 000, схема геоботанического районирования), снимки Landsat-8/OLI, полученные в сроки, совпадающие или близкие к срокам радиолокационных съёмок, литературные источники и архив данных на весь анализируемый период о температуре воздуха, характере снежного покрова и осадках. На о. Котельный всего две метеостанции обеспечивают наблюдения за погодой: «Остров Котельный» и «пролив Санникова», расположенные соответственно на северной и южной оконечностях на его западном побережье (http://rp5.ru/), но ввиду больших размеров территории эти данные не всегда характеризуют состояние местности в глубине острова и в его восточной части.

Методы исследования

Для обеспечения сопоставимости разновременных снимков Sentinel-1A в программном комплексе SNAP (Sentinel Application Platform) была проведена их предварительная обработка, которая для всех 49 отобранных изображений включала следующие этапы: 1) импорт данных во внутренний формат программы (BEAM-DIMAP); 2) радиометрическая калибровка, позволяющая перейти от «сырых» значений пикселов (DN — digital number) к коэффициенту обратного рассеяния радиосигнала σ_0, или удельной эффективной площади рассеяния; для данных Sentinel-1 уровня обработки GRD $\sigma_0 = DN^2/A^2_\sigma$, где DN — цифровые отсчёты из файла measurement.tiff, A_σ — калибровочные коэффициенты из файла calibration.xml (Radiometric..., 2015); 3) автоматическая корегистрация — точное геометрическое согласование разновременных снимков, которое важно для расчёта временных трендов УЭПР; 4) ортотрансформирование изображений с использованием общедоступной цифровой модели рельефа ACE30 для

возможности их дальнейшего совмещения с дополнительными источниками информации; 5) пересчёт значений σ_0 в децибелы (дБ).

Для сравнения радиолокационных изображений со всеми доступными источниками пространственной информации был сформирован единый ГИС-проект с геометрически согласованными радиолокационными изображениями, снимками Landsat-8/OLI и картами.

В пределах типичных ландшафтов острова выбрано десять ключевых участков, положение которых показано на *рис. 2.* На каждом из участков выделены элементарные площадки, для которых рассчитаны средние значения УЭПР по каждому из 49 изображений. Расположение элементарных площадок в пределах ключевых участков представлено на *рис. 3* (см. с. 128), а их описание, составленное на основе дополнительных источников, приведено в подрисуночной подписи.

На *рис. 4* (см. с. 129) сопоставлены графики изменения УЭПР для элементарных площадок, сформированные по 49 съёмкам в согласованной горизонтальной поляризации (вверху), и хода среднесуточных температур по данным с северной и южной метеостанций за тот же двухлетний период (внизу).

Значения вегетационного индекса (NDVI), который позволяет охарактеризовать степень развития растительного покрова, получены лишь для некоторых участков в отдельные сроки 2016 г., поскольку снимки оптического диапазона Landsat-8/OLI в каждую из дат покрывают только часть острова, к тому же практически на всех присутствует облачность. Значения NDVI, рассчитанные по калиброванным значениям яркости, хорошо характеризуют наличие и густоту растительного покрова, достигая максимальных значений ~0,5 для участков 2, 3 и 7 во второй половине июля – начале августа, несколько ниже — около 0,4 — на участке 9 в то же время и около 0,2–0,3 для участков 6 и 8. При этом данные значения очень слабо меняются за относительно бесснежный период (от конца июня к началу сентября), что свидетельствует о незначительности изменений состояния растительного покрова. Участки 1, 4 и 5 практически не имеют растительного покрова.

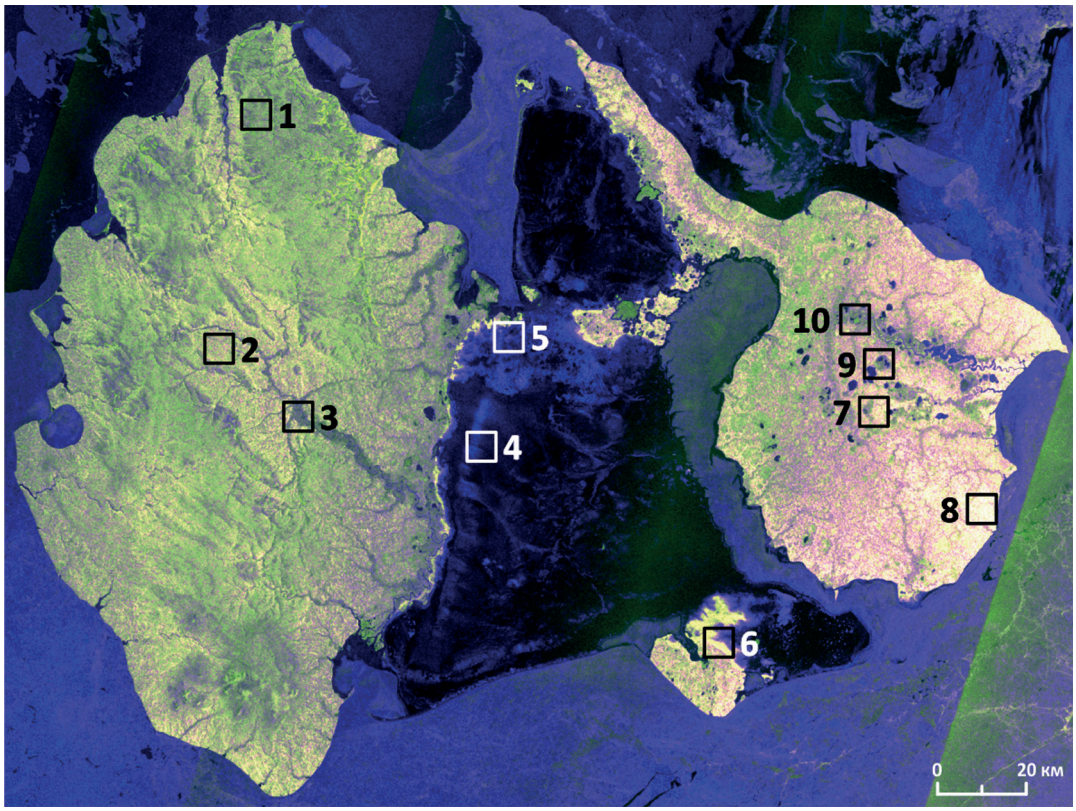

Рис. 2. Положение ключевых участков на радиолокационном снимке Sentinel-1A, 03.07.2015 (цветовой синтез изображений: R — ГГ, G — ГВ, B — ГГ/ГВ)

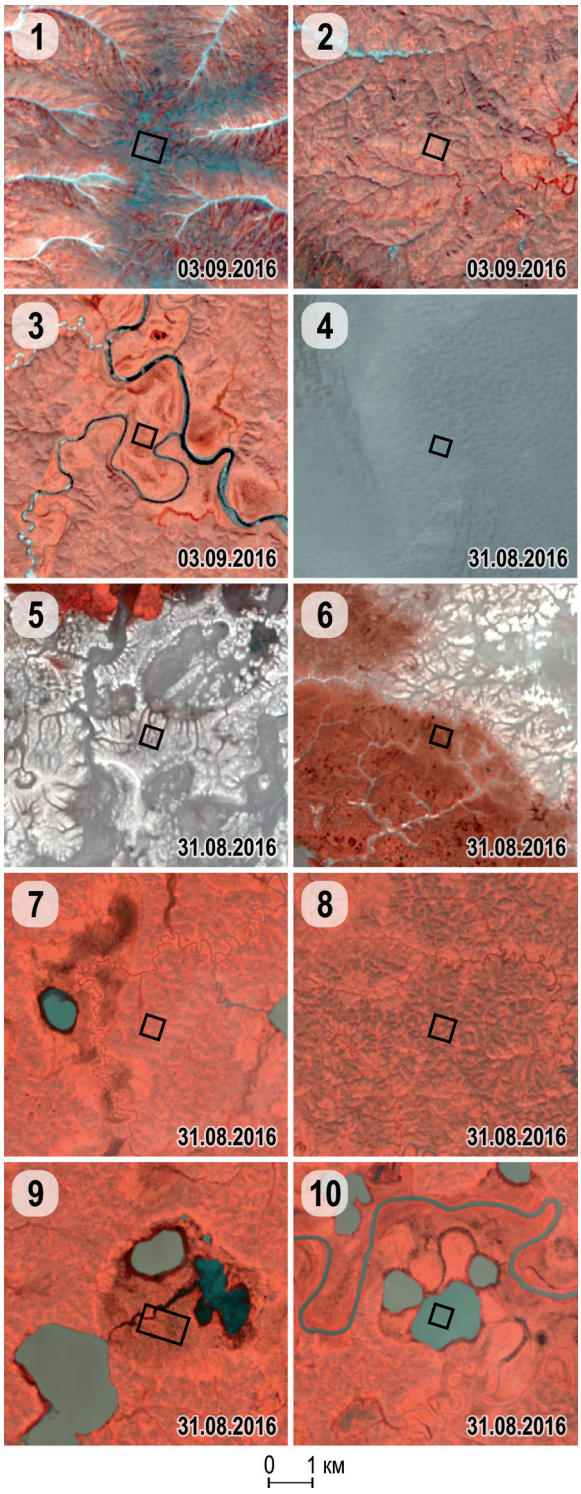

Рис. 3. Элементарные площадки (чёрные прямоугольники) для расчёта средних УЭПР на снимках Landsat-8/OLI, цветовой синтез каналов R — 0,85–0,88, G — 0,64–0,67, B — 0,53–0,59 мкм: 1 — слабо расчленённая платообразная возвышенная равнина с растительностью горных арктических пустынь; 2 — низменная равнина с умеренной степенью эрозионного расчленения, с тундровой растительностью (о. Котельный); 3 — речная долина с болотной растительностью; 4 — плоская, местами слабоволнистая первая морская терраса с сильно разреженной растительностью песчаных арктических пустынь; 5 — вторая морская терраса с преимущественно эрозионным расчленением и разреженной растительностью песчаных полярных пустынь; 6 — вторая морская терраса с преимущественно эрозионным расчленением и тундровой растительностью; 7 — низменная равнина с умеренной степенью эрозионного расчленения, с тундровой растительностью (о. Фаддеевский); 8 — низменная равнина с высокой степенью эрозионного расчленения и тундровой растительностью; 9 — плоское днище термокарстовой котловины (аласа) с болотной растительностью; 10 — озеро

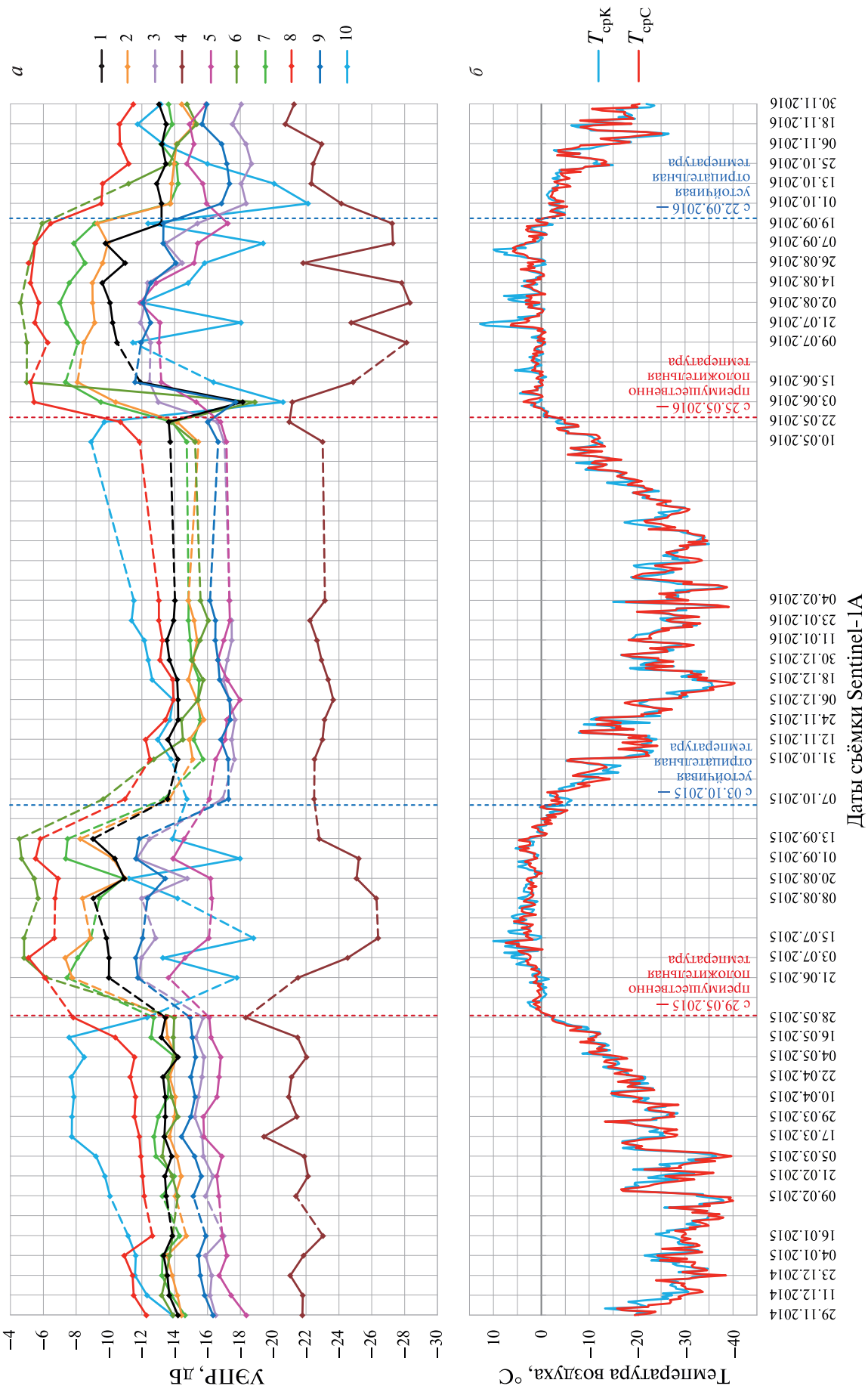

Рис. 4. Графики: *а* — УЭПР в ГГ-поляризации для элементарных площадок (пунктир — отсутствие данных съёмок); *б* — среднесуточных температур по данным метеостанций «Остров Котельный» (ТсрК) и «Пролив Санникова» (ТсрС)

Результаты

Приведённые на *рис. 4* согласованные графики изменения температуры воздуха и значений коэффициента обратного рассеяния в первую очередь демонстрируют характерные, чётко выраженные различия «тёплого» и «холодного» периодов, которые проявляются как в ходе среднесуточных температур, так и в ходе коэффициента обратного рассеяния: для большей части выбранных элементарных площадок в период с устойчивыми отрицательными температурами (октябрь – май) характерны низкие (относительно летних) значения УЭПР, а в период с преимущественно положительными температурами (июнь – сентябрь) — высокие; исключение составляют участок песчаной арктической пустыни (4) и озеро (10).

Причём можно отметить, что несмотря на то, что в зимний период колебания температуры имеют значительно бóльшую амплитуду, чем в летний, состояние местности, характеризуемое обратным рассеянием, в целом является более однородным: каждой площадке свойственен небольшой разброс значений УЭПР, а графики разных площадок располагаются близко друг к другу. Низкие отрицательные температуры способствуют «нивелировке» обратного рассеяния из-за низкой диэлектрической проницаемости промёрзших грунтов и наличия снежного покрова. В летний же период, напротив, наблюдаются бóльшие вариации УЭПР для каждой площадки и намного больший разброс значений в целом (кривые значительно отстоят друг от друга). Эти обстоятельства позволяют сделать вывод, что основные различия в состоянии местности в течение года обусловлены процессами, связанными с оттаиванием и промерзанием сезонно-талого слоя.

Несмотря на общее сходство, характер кривых чётко различается для выбранных типичных ландшафтов, особенно в летний период. Рассмотрим подробнее основные различия в общей интенсивности обратного рассеяния от участков (порядок соответствует нарастанию среднего значения УЭПР) и характере её сезонного поведения для разных типов поверхности, которые в некоторой степени позволяют выделить влияющие на УЭПР факторы.

Самые низкие значения УЭПР (ниже –18 дБ) в течение всего исследуемого периода наблюдались для участка 4, расположенного в пределах песчаной арктической пустыни Земли Бунге, что хорошо согласуется с известной из литературы низкой диэлектрической проницаемостью сухих песчаных отложений и их способностью пропускать радиоволну в глубину до встречи с объектом с иными диэлектрическими свойствами (Woodhouse, 2005). Постепенное снижение значений УЭПР в тёплый период относительно морозного обусловлено, вероятно, просыханием песков с поверхности, а скачкообразный характер графика этого участка во второй летний период может быть обусловлен намоканием песков (более высокие значения УЭПР) вследствие выпадения осадков и последующим просыханием (более низкие). Например, резкое повышение значений УЭПР 26.08.2016, предположительно, объясняется сильным намоканием, так как на северной метеостанции отмечено выпадение снега, а на южной — ливни.

Участок 5, расположенный в пределах возвышенности Евсекю-Булгуннях, как и участок 4, практически полностью лишён растительного покрова. При этом свойственные ему значения УЭПР выше (в среднем на 5 дБ зимой и на 10 дБ летом), чем на участке песчаной пустыни, что обусловлено его более заметным эрозионным расчленением, которое увеличивает шероховатость поверхности и, как следствие, интенсивность обратного сигнала.

График изменения УЭПР участка 3 в долине реки Балыктах во многом схож по рисунку с графиком 5-го участка, однако имеет более высокие значения УЭПР, что, вероятно, обусловлено наличием выраженного растительного покрова (эта элементарная площадка имеет одно из самых высоких значений NDVI: до 0,49 в начале августа). Однако, несмотря на наличие достаточно обильной растительности, значения УЭПР не слишком высоки (не более –12...–15 дБ летом). Вероятно, относительно невысокий уровень обратного рассеяния связан с тем, что этот участок характеризуется плоским рельефом, что способствует доминированию однократного рассеяния сигнала от этой площадки. Существенный вклад может также вносить высокая заболоченность участка: понижение значений УЭПР обусловлено как наличием

пятен открытой водной поверхности между вегетирующей растительностью, суммарно приводящих к снижению интенсивности обратного рассеяния в пикселе изображения, так и тем, что относительно низкорослая растительность не препятствует прохождению радиоволны до гладкой поверхности воды, приводя к преобладанию однократного рассеяния.

Участок 9 в термокарстовой котловине в зимний период характеризуется значениями УЭПР в пределах –14...–17 дБ с последующим повышением летом до –11...–14 дБ, что связано с оттаиванием сезонно-талого слоя и развитием растительности. Стоит отметить, что для аласа характерна достаточно обильная растительность (вегетационный индекс достигает 0,43), однако низкие значения УЭПР, что можно объяснить плоским рельефом котловины и её заболоченностью, как и в случае с участком 3 в речной долине. Обращает на себя внимание выраженное падение УЭПР на 2–11 дБ 3 июня 2016 г. с последующим резким повышением на 4–14 дБ на площадках 1, 6, 9 и 10. По снимку Landsat-8/OLI на ту же дату определено, что на этой территории лежит снег. Из литературных источников (Antonova et al., 2016b; Woodhouse, 2005) известно о понижающем УЭПР влиянии мокрого снега вследствие поглощения им радиоволн. Таким образом, можно объяснить понижение УЭПР 3 июня на этих четырёх участках наличием именно мокрого (ввиду высокой температуры воздуха) снега.

Параметр УЭПР на участке плато (1) в зимние периоды слабо изменяется в пределах –13...–14 дБ, а летом достигает –9...–11 дБ. Известно, что ввиду высотной поясности на плато находятся арктические пустыни с разреженной, угнетённой и бедной по видовому составу растительностью (Советская Арктика..., 1970). Слабое развитие растительного покрова подтверждается значениями NDVI, не превышающими 0,14 за летний период 2016 г. Вероятно, что основной вклад в формирование обратного сигнала на участке плато вносит наличие скоплений грубых обломков горных пород, повышающих шероховатость поверхности.

Участки 2 (равнина на острове Котельном) и 7 (равнина на острове Фадеевский) имеют сходный характер графиков изменения УЭПР при различиях в 1–2 дБ преимущественно во второй половине лета (значения 7-го участка выше). В целом интенсивность обратного рассеяния этих участков в летний период изменяется в пределах –7...–11 дБ, а зимой в диапазоне –13...–15 дБ. Относительно высокие значения УЭПР обоих участков определяются главным образом сильной расчленённостью рельефа и обилием растительного покрова (NDVI достигает 0,49 на участке 2 и 0,51 на участке 7), однако доступные дополнительные источники не позволяют однозначно объяснить различия между ними. Это могут быть такие факторы, как различия в микро- и нанорельефе в пределах площадок, в структуре растительного покрова, характере увлажнения. Несистематический характер различий не позволяет связать их с разными углами визирования при съёмке.

Участок возвышенности Земли Бунге (6) характеризуется одними из самых высоких летних значений УЭПР (–4...–6 дБ) и низкими зимними значениями (–13...–16 дБ). Наибольший вклад в обратное рассеяние сигнала здесь, очевидно, вносят неровности рельефа и растительный покров (однако NDVI этого участка относительно невысок — 0,26 в конце августа, что свидетельствует о меньшем, чем для некоторых других участков, влиянии на УЭПР растительного покрова).

Одни из самых высоких значений УЭПР в течение всех сезонов характерны для участка 8 на юго-востоке острова Фаддеевского. На снимке Landsat-8/OLI (см. *рис. 3*) видно, что для этого участка характерна высокая степень эрозионного расчленения (выше, чем, например, на соседнем участке 7). Вероятно, что небольшие склоны, обращённые к радиолокатору, приводят к общему повышению УЭПР, в том числе и зимой (–10...–14 дБ). Высокие значения УЭПР могут быть связаны среди прочего с наличием множества микроформ криогенного рельефа, повышающих шероховатость поверхности этого участка. Возрастание интенсивности обратного рассеяния летом до –5...–7 дБ связано с развитием растительного покрова (NDVI достигает 0,35).

Существенно отличающийся от других тестовых объектов характер изменений УЭПР выявлен для участка 10 — озёра на острове Фаддеевский. Летом этот участок характеризуется резкими перепадами: размах значений УЭПР достигает 9 дБ.

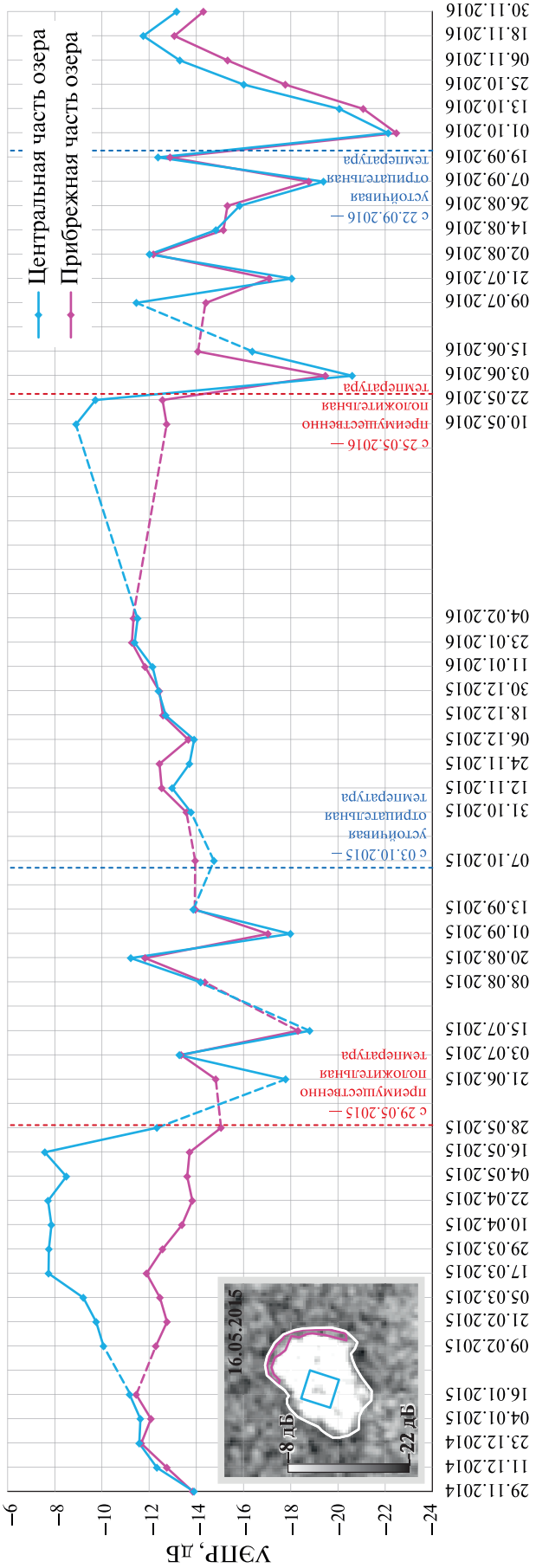

Рис. 5. Графики изменения УЭПР в ГГ-поляризации для разных частей озера

Можно предположить, что низкие значения наблюдаются в период ветрового затишья (спокойная поверхность воды — гладкая, что приводит к зеркальному отражению радиоволн в сторону, противоположную радиолокатору), а высокие, напротив, в ветреный период (взволнованная водная поверхность — шероховатая). Зимой для поверхности выбранного озера наблюдается постепенный рост УЭПР: в зимние периоды 2014/2015 и 2015/2016 гг. он составил приблизительно 6 дБ. Среди всех элементарных площадок этот участок характеризуется максимальными зимними значениями интенсивности обратного сигнала. Объяснение такого характера изменения УЭПР можно найти в работах (Antonova et al., 2016b; Atwood et al., 2015), где описана следующая закономерность взаимодействия радиоволн со льдом пресных озёр. В период, когда лёд только устанавливается на поверхности озера, преобладает однократное отражение волн в сторону от радиолокатора. По мере возрастания мощности плавучего льда происходит постепенное увеличение УЭПР и последующее достижение состояния насыщения, когда интенсивность обратного сигнала остаётся достаточно стабильной вплоть до наступления таяния льда (в нашем случае эта стадия хорошо заметна на графике *рис. 4*: в период 17.03.2015–16.05.2015 наблюдаются устойчивые значения УЭПР на уровне –8 дБ). В результате взаимодействия радиоволны с толщей льда и находящимися в нём пузырьками воздуха (при их наличии), а также с шероховатой границей «плавучий лёд – незамёрзшая вода» волна возвращается в сторону радиолокатора. Такая картина наблюдается только в том случае, когда участок озера не промерзает до дна. В случае же полного промерзания озера (или его части) низкий контраст в диэлектрической проницаемости льда и мёрзлого грунта приводит к слабому рассеянию волны на их границе. Хорошо выраженные различия значений УЭПР промерзающей прибрежной и непромерзающей центральной части озера иллюстрирует *рис. 5* (см. с. 132). После полного промерзания прибрежной части исследуемого озера (после 16.01.2015 и 04.02.2016) роста УЭПР не происходит, а к концу зимы различия в значениях УЭПР прибрежной и центральной частей озера достигают 6 и 4 дБ (в 2015 и 2016 гг. соответственно).

Можно было ожидать различий в яркости радиолокационного изображения исследуемой территории на дальнем и ближнем краях (для площадок 1, 2, 3 и 7, 8, 9), поскольку угол падения волн в пределах исследуемой территории меняется в пределах 28–43°. Как показал анализ горизонтальных профилей УЭПР всего изображения, эти различия хорошо видны на участках открытой водной поверхности, однако на участках суши в пределах исследуемой территории они выражены слабо. Так, площадки 2 и 7, расположенные соответственно в дальней (угол падения волн ~40,5°) и ближней (~30,3°) зонах в пределах сходных ландшафтов, имеют очень близкие графики сезонных изменений. То есть можно предположить, что в этом случае различия в значениях УЭПР, обусловленные особенностями местности, существенно превышают различия из-за влияния углов съёмки. Тем не менее исследование влияния угла падения волн на изображение участков суши остаётся перспективной задачей.

Заключение

Общедоступные данные радиолокационного зондирования Земли с европейских спутников Sentinel-1 — новый источник информации, обеспечивающий возможность мониторинга арктических районов, актуального в связи с заметными климатическими изменениями и возрастающей антропогенной нагрузкой. Проведённый на основе двухлетней серии снимков Sentinel-1A анализ сезонных изменений УЭПР тестовых участков, расположенных в пределах типичных ландшафтов острова Котельный, позволил выявить следующие закономерности:

- для большинства тестовых площадок зимние значения УЭПР ниже, чем летние (размах между минимальными зимними и максимальными летними значениями для разных объектов составляет от 5 до 11 дБ), что объясняется, прежде всего, сменой диэлектрических свойств поверхности, связанных с промерзанием и оттаиванием сезонно-талого слоя;

- существенное влияние на обратный сигнал оказывает характер рельефа. Как правило, участки с сильным эрозионным расчленением имеют более высокие значения УЭПР, чем участки с плоским рельефом;
- на участках, практически лишённых растительного покрова, существенную роль в формировании обратного сигнала играет характер рыхлых отложений. Относительно ровные песчаные поверхности в силу низкой диэлектрической проницаемости имеют очень низкие значения УЭПР. Наличие грубых обломочных пород приводит к увеличению шероховатости поверхности и, как следствие, к возрастанию интенсивности обратного сигнала;
- участки с наличием тундровой и болотной растительности в целом имеют более высокие значения УЭПР, чем участки с полярно-пустынной растительностью или вовсе её лишённые;
- несмотря на наличие достаточно обильной растительности, выявляемой по высоким для исследуемой территории значениям вегетационного индекса, заболоченные участки характеризуются более низкими значениями УЭПР, чем прочие участки с аналогичным NDVI, что можно объяснить преобладанием однократного рассеяния волн ввиду наличия участков открытой водной поверхности и того, что низкорослая растительность не препятствует прохождению радиоволны до гладкой поверхности воды;
- озёра характеризуются сильно изменчивыми летними значениями УЭПР в зависимости от состояния поверхности (гладкая или взволнованная). В зимний период участки озёр, не промерзающие до дна, характеризуются постепенным ростом (на 6 дБ) и дальнейшей стабилизацией значений УЭПР. При этом большую часть зимнего периода именно такие участки имеют максимальные значения УЭПР среди всех остальных площадок;
- наличие мокрого снега на поверхности земли или озёрного льда приводит к понижению УЭПР до –17...–20 дБ.

Стоит отметить, что в некоторых случаях однозначная интерпретация значений УЭПР и их изменений затруднена ввиду недостаточности сведений, предоставляемых дополнительными источниками. В частности, предоставляемых сайтом «Расписание погоды» (http://rp5.ru/) сведений о таких параметрах, как осадки, высота снежного покрова, недостаточно для характеристики столь обширной территории, какую представляет собой остров Котельный. Обе метеостанции расположены в прибрежной зоне на западе острова, а потому едва ли можно распространять эти сведения на всю внутреннюю территорию. Однозначная интерпретация значений УЭПР и их изменений возможна при наличии материалов детальных наземных обследований, включая данные о погоде в разных частях территории.

Ввиду того, что рассмотренные площадки более уверенно дифференцируются по характеру многовременного хода УЭПР, чем по снимку одного произвольного срока, представляется перспективным использование именно разновременных радиолокационных снимков для классификации типов поверхности арктических территорий и их последующего картографирования.

Литература

1. Материалы комплексного экологического обследования участков территории, обосновывающего придание этой территории правового статуса особо охраняемой природной территории федерального значения — государственного природного заказника «Новосибирские острова». Т. 1. М.: Всемирный Фонд дикой природы, 2015. 483 с.
2. *Митник Л. М.*, *Хазанова Е. С.* Динамика ледяного покрова в морях Восточно-Сибирском и Лаптевых по данным спутникового микроволнового зондирования во второй половине октября 2014 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 100–113.

3. *Мышляков С. Г.* Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства // Геоматика. 2016. № 2. С. 16–24.
4. Новосибирские острова: сб. статей / под ред. Г. Л. Рутилевского, Р. К. Сиско. Л.: Мор. транспорт, 1963. 233 с.
5. Новосибирские острова. Физ.-геогр. характеристика архипелага / под ред. Я. Я. Гаккеля. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 212 с.
6. *Родионова Н. В.* Сезонные вариации обратного рассеяния от естественных покровов Подмосковья в сезон 2015–2016 годов по радарным данным SENTINEL 1A // 14-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. 2016. С. 367. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5482.
7. Советская Арктика. Моря и острова Северного Ледовитого океана. М.: Наука, 1970. 526 с.
8. *Antonova S.*, *Kääb A.*, *Heim B.*, *Langer M.*, *Boike J.* (2016a) Spatio-temporal variability of X-band radar backscatter and coherence over the Lena River Delta, Siberia // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 182. P. 169–191.
9. *Antonova S.*, *Duguay C. R.*, *Kääb A.*, *Heim B.*, *Langer M.*, *Westermann S.*, *Boike J.* (2016b) Monitoring bedfast ice and ice phenology in lakes of the Lena river delta using TerraSAR-X backscatter and coherence time series // Remote Sensing. 2016. V. 8. Iss. 11. P. 903.
10. *Atwood D. K.*, *Gunn G. E.*, *Roussi C.*, *Wu J.*, *Duguay C.*, *Sarabandi K.* Microwave backscatter from Arctic lake ice and polarimetric implications // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 53. Iss. 11. P. 5972–5982.
11. *Crosetto M.*, *Monserrat O.*, *Devanthéry N.*, *Cuevas-González M.*, *Barra A.*, *Crippa B.* Persistent scatterer interferometry using Sentinel-1 data // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. V. XLI-B7. P. 835–839.
12. *Duguay C. K.*, *Rouse W. R.*, *Lafleur P. M.*, *Boudreau L. D.*, *Crevier Y.*, *Pultz T. J.* Analysis of multi-temporal ERS–1 SAR data of subarctic tundra and forest in the northern Hudson Bay Lowland and implications for climate studies // Canadian J. Remote Sensing. 1999. V. 25. No. 1. P. 21–33.
13. *Lauknes T. R.*, *Larsen Y.*, *Eckerstorfer M.*, *Christiansen H. H.* Permafrost landform dynamics at Kapp Linné central Svalbard, observed using high-resolution TerraSAR-X data, 2009–2012 // TerraSAR-X Science Team Meeting: abstr. 10–12 June 2013, DLR Oberpfaffenhofen. 1 p.
14. *Liu L.*, *Zhang T.*, *Wahr J.* InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the North Slope of Alaska // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. Iss. F3. CiteID F03023. 14 p.
15. *Nagler T.*, *Rott H.*, *Hetzenecker M.*, *Wuite J.*, *Potin P.* The Sentinel-1 Mission: New Opportunities for Ice Sheet Observations // Remote Sensing. 2015. V. 7. Iss. 7. P. 9371–9389.
16. *Park S.-E.*, *Yamaguchi Y.*, *Singh G.*, *Bartsch A.* Spatio-temporal monitoring of permafrost region using SAR remote sensing // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. 2010. V. 38. Pt. 8. P. 142–144.
17. *Pivot F.* C-Band SAR imagery for snow-cover monitoring at Treeline, Churchill, Manitoba, Canada // Remote Sensing. 2012. V. 4. Iss. 7. P. 2133–2155.
18. Radiometric calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF. European Space Agency, 2015. 13 p.
19. Sentinel-1 User Handbook. European Space Agency, 2013. 80 p.
20. *Sharov A.*, *Nikolskiy D.* Satellite map series of long-term elevation changes on Eurasia's northernmost ice caps / ed. R. Lasaponara // Proc. EARSeL Symp. 3–6 June 2013. 14 p.
21. *Sobiech J.*, *Boike J.*, *Dierking W.* Observation of melt onset in an Arctic tundra landscape using high resolution TerraSAR-X and Radarsat-2 data // Proc. IGARSS 2012. 2012. P. 3552–3555.
22. *Strozzi T.*, *Kouraev A.*, *Wiesmann A.*, *Sharov A.*, *Wegmüller U.*, *Werner C.* Estimation of Arctic glacier motion with satellite L-band SAR data // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. Iss. 3. P. 636–645.
23. *Woodhouse I. H.* Introduction to Microwave Remote Sensing. CRC Press, 2005. 400 p.

Seasonal variability of backscattering coefficient based on Sentinel-1 radar images: a case study of Kotelny Island

K. A. Troshko[1,2], E. A. Baldina[1]

[1] *M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: baldina@geogr.msu.ru
[2] *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*
E-mail: troshko_ka@ntsomz.ru

New satellite radar system Sentintel-1 implements observation of polar regions with high frequency providing an opportunity of regular monitoring of these remote and poorly studied territories. A large amount of information obtained during the first years of this system exploitation allows estimating its value for characterization of these regions. We have examined a time series of Sentintel-1A/C-band SAR (synthetic aperture radar) backscatter coefficient for the period between November 2014 and November 2016 to assess their potential for detecting major seasonal changes of the surface within Kotelny Island (New Siberian Islands archipelago). Temporal backscatter signatures of ten test sites located within the typical landscapes of the island were analyzed. A set of additional information sources about the area (maps, optical images, meteorological data) used for radar images interpretation allowed revealing the main factors influencing the backscattering signal. The largest backscatter variations observed within the studied sites are associated with the processes accompanying the periods of established negative (freezing of active layer, snowfall) and positive (thawing of snow cover and active layer, vegetation growth) temperatures. Differences of backscatter within each image are related to peculiarities of the relief, soils, the type and density of vegetation, amount of standing water. A good separability of Arctic landscapes based on SAR backscatter trends makes it promising to use multi-temporal radar data for landscape types classification and mapping.

Keywords: Arctic, New Siberian Islands, Kotelny Island, tundra landscapes, permafrost, radar remote sensing, Sentinel-1, multi-temporal images, C-band, normalized radar cross section, NRCS temporal signatures, seasonal changes

Accepted: 11.10.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-123-137

References

1. *Materialy kompleksnogo ekologicheskogo obsledovaniya uchastkov territorii, obosnovyvayushhego pridanie etoy territorii pravovogo statusa osobo okhranyaemoy prirodnoy territorii federal'nogo znacheniya — gosudarstvennogo prirodnogo zakaznika "Novosibirskie ostrova". Tom 1* (The materials of a complex ecological survey of sites that justify bringing in this area the legal status of specially protected natural area of federal significance — the state natural reserve "New Siberian Islands", Vol. 1), Moscow: WWF, 2015, 484 p.
2. Mitnik L. M., Khazanova E. S., Dinamika ledyanogo pokrova v moryakh Vostochno-Sibirskom i Laptevykh po dannym sputnikovogo mikrovolnovogo zondirovaniya vo vtoroy polovine oktyabrya 2014 g. (Ice cover dynamics in the East Siberian and Laptev Seas at the second half of October 2014 from remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 100–113.
3. Myshlyakov S. G., Vozmozhnosti radarnykh snimkov Sentinel-1 dlya resheniya zadach selskogo hozyaystva (Possibilities of Sentinel-1 radar imagery for agriculture), *Geomatica*, 2016, No. 2, pp. 16–24.
4. *Novosibirskie ostrova. Sbornik statey* (New Siberian Islands. Collected articles), G. L. Rutilevsky, R. K. Sisko (Eds.), Leningrad: Mor. Transport, 1963, 233 p.
5. *Novosibirskie ostrova. Fiz.-geogr. kharakteristika archipelaga* (New Siberian Islands. Geographical characteristics of the archipelago), Ya. Ya. Gakkel (Ed.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967, 212 p.
6. Rodionova N. V., Sezonnye variatsii obratnogo rasseyaniya ot estestvennykh pokrovov Podmoskov'ya v sezon 2015–2016 godov po radarnym dannym SENTINEL 1A (Seasonal variations of backscatter from natural covers of Moscow region during the season 2015–2016 based on Sentinel-1A radar data), *Materialy XIV Konf. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (XIV Conf. "Current problems in remote sensing of the Earth from space", Book of Abstracts), 2016, p. 367.

7. *Sovetskaya Arktika. Morya i ostrova Severnogo Ledovitogo okeana* (Soviet Arctic. Seas and islands of the Arctic Ocean), Moscow: Nauka, 1970, 526 p.
8. Antonova S., Kääb A., Heim B., Langer M., Boike J., Spatio-temporal variability of X-band radar backscatter and coherence over the Lena River Delta, Siberia, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 182, pp. 169–191.
9. Antonova S., Duguay C. R., Kääb A., Heim B., Langer M., Westermann S., Boike J., Monitoring bedfast ice and ice phenology in lakes of the Lena river delta using TerraSAR-X backscatter and coherence time series, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Issue 11, pp. 903.
10. Atwood D. K., Gunn G. E., Roussi C., Wu J., Duguay C., Sarabandi K., Microwave backscatter from Arctic lake ice and polarimetric implications, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, Issue 11, pp. 5972–5982.
11. Crosetto M., Monserrat O., Devanthéry N., Cuevas-González M., Barra A., Crippa B., Persistent scatterer interferometry using Sentinel-1 data, *Intern. Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, Vol. XLI-B7, pp. 835–839.
12. Duguay C. K., Rouse W. R., Lafleur P. M., Boudreau L. D., Crevier Y., Pultz T. J., Analysis of multi-temporal ERS–1 SAR data of subarctic tundra and forest in the northern Hudson Bay Lowland and implications for climate studies, *Canadian J. Remote Sensing*, 1999, Vol. 25, No. 1, pp. 21–33.
13. Lauknes T. R., Larsen Y., Eckerstorfer M., Christiansen H. H., Permafrost landform dynamics at Kapp Linné central Svalbard, observed using high-resolution TerraSAR-X data, 2009–2012, *TerraSAR-X Science Team Meeting*, 10–12 June 2013, DLR Oberpfaffenhofen, 1 p.
14. Liu L., Zhang T., Wahr J., InSAR measurements of surface deformation over permafrost on the North Slope of Alaska, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, Issue F3, CiteID F03023, 14 p.
15. Nagler T., Rott H., Hetzenecker M., Wuite J., Potin P., The Sentinel-1 Mission: New Opportunities for Ice Sheet Observations, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, Issue 7, pp. 9371–9389.
16. Park S.-E., Yamaguchi Y., Singh G., Bartsch A., Spatio-temporal monitoring of permafrost region using SAR remote sensing, *International Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2010, Vol. XXXVIII, Part 8, pp. 142–144
17. Pivot F., C-Band SAR imagery for snow-cover monitoring at Treeline, Churchill, Manitoba, Canada, *Remote Sensing*, 2012, Vol. 4, Issue 7, pp. 2133–2155.
18. *Radiometric calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF*, European Space Agency, 2015, 13 p.
19. *Sentinel-1 user handbook*, European Space Agency, 2013, 80 p.
20. Sharov A., Nikolskiy D., Satellite map series of long-term elevation changes on Eurasia's northernmost ice caps, *Proceedings of EARSeL Symposium*, 3–6 June 2013, 14 p.
21. Sobiech J., Boike J., Dierking W., Observation of melt onset in an Arctic tundra landscape using high resolution TerraSAR-X and Radarsat-2 data, *IGARSS 2012 Proceedings*, pp. 3552–3555.
22. Strozzi T., Kouraev A., Wiesmann A., Sharov A., Wegmüller U., Werner C., Estimation of Arctic glacier motion with satellite L-band SAR data, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, Issue 3, pp. 636–645.
23. Woodhouse I. H., *Introduction to Microwave Remote Sensing*, CRC Press, 2005, 400 p.