



Чаша озера Спартаковское, заполняемая тальми водами. 25 июля 2022 года



Измерение уровня воды на оз. Спартаковское. 25 июля 2022 года

Результаты работы использованы океанологами, ледоисследователями, гидрологами суши, гляциологами, палеогеографами, метеорологами.

На территории НИС создан и в октябре 2022 года запущен в эксплуатацию пункт федеральной сети геодезических станций — ФСГС, необходимый для повышения точности определения координат на территории России и применения спутниковой системы ГЛОНАСС в системе геодезического и навигационного обеспечения. Работы выполнены АО «Аэрогеодезия» по поручению АО «Роскартография» в тесном сотрудничестве со специалистами ААНИИ.

Высокоширотной арктической экспедицией ведется последовательная работа по организации снежно-ледовой взлетно-посадочной полосы (ВПП) «Мыс Баранова». В период с апреля по сентябрь 2022 года проведен ряд подготовительных мероприятий: инспекция ВПП руководителем Красноярского управления Росавиации, выполнение комплекса геодезических и строительно-восстановительных работ, доставка на НИС оборудования и техники аэродромного обеспечения полетов. С ноября 2021 года ведется обустройство снежного покрытия на снежно-ледовой ВПП.

Снабжение НИС на предстоящий годичный период работы обеспечено НЭС «Академик Трёшников» 18–22 сентября 2022 года. На стационар доставлено 480 тонн груза, в частности дизельное топливо, оборудование для оснащения и обслуживания снежно-ледовой посадочной площадки «Мыс Баранова» и заправки воздушных судов, научное оборудование и материалы, продукты питания. Численность состава НИС в 2022/23 году составляет 20 человек.

В настоящее время стационар представляет собой опорную базу наблюдений в рамках мониторинга и научных исследований в области наук о Земле в высокоширотной части Арктической зоны РФ с развитой инфраструктурой и с реальной перспективой обеспечения транспортной доступности с применением авиационных средств в течение большей части года. С введением в строй НЭС «Северный полюс» возрастает роль стационара в вопросах авиационного обеспечения Ледостойкой самодвижущейся платформы.

*С.А. Семенов, В.Т. Соколов, В.Е. Соколова (ААНИИ).  
Фото Г.Б. Лебедева*

## **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МОРСКОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ СНИМКОВ ИСЗ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ С РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ**

Рост грузоперевозок по Северному морскому пути (СМП), освоение месторождений углеводородного сырья на шельфе арктических морей сопровождаются увеличением спроса потребителей на достоверную оперативную информацию о состоянии ледяного покрова, наличии благоприятных для ледового плавания районов нарушений сплошности, а также степени торосистости. При этом дополнительная информация о местонахождении айсбергов на трассах СМП будет способствовать

увеличению безопасности навигации. В повседневной практике ледового информационного обеспечения потребителей удовлетворить такие запросы можно только при широком использовании автоматизированных методов оценки состояния морского ледяного покрова по спутниковым данным. В ААНИИ разрабатывается ряд таких методов, в том числе метод оценки нарушений сплошности ледяного покрова (НСЛ) и обнаружения торосов.

### Метод оценки нарушений сплошности ледяного покрова по данным оптических спектральных каналов

Последовательность используемых технологических процедур состоит из следующих этапов:

- создание облачной маски;
- бинаризация изображения;
- морфологическое прореживание;
- получение полигонов разводий;
- определение геометрических параметров разводий.

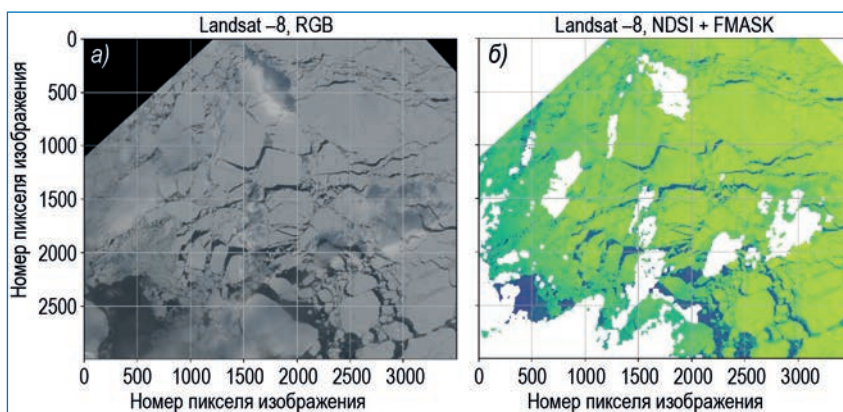
Для создания маски облачности при обнаружении НСЛ применяется алгоритм Fmask, разработанный в университете Коннектикута (США) для оптико-электронной аппаратуры ИСЗ Landsat 4-8, а затем адаптированный для Sentinel-2. В основе метода — дерево принятия ре-

шений, учитывающее яркость в нескольких спектральных каналах и нормализованный разностный снежный индекс (Normalized Difference Snow Index, NDSI). Величина NDSI определяется по выражению:

$$NDSI = (\rho\lambda(\text{green}) - \rho\lambda(\text{SWIR1})) / (\rho\lambda(\text{green}) + \rho\lambda(\text{SWIR1})),$$

где  $\rho\lambda(\text{green})$  — коэффициент отражения в зеленой области спектра (0,53–0,59 мкм — для Landsat-8),  $\rho\lambda(\text{SWIR1})$  — коэффициент отражения в первом ближне-волновом канале Landsat-8 (1,57–1,65 мкм). По величине NDSI определяется порог, превышение которого означает, что данный пиксель входит в класс «облачность». Для Landsat-8 облачный порог NDSI > 0,6.

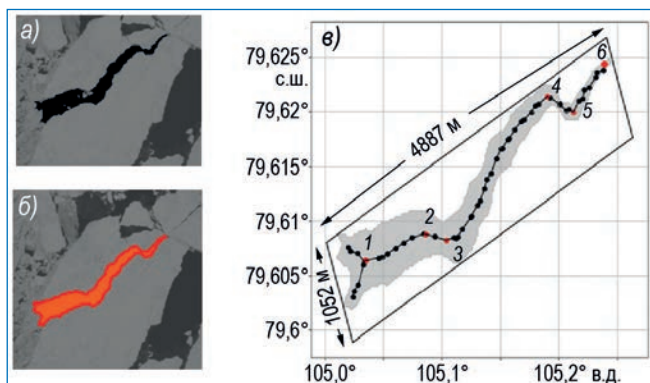
В результате последовательного применения правил дерева решения к входному снимку по алгоритму Fmask выделяются несколько классов: облачность, тени от облаков, вода, снег и безоблачная территория.



Нанесение маски облачности на снимок Landsat-8: а) фрагмент исходного снимка; б) облачная маска с использованием индекса NDSI и алгоритма Fmask

### Определение геометрических параметров разводий

Для вычисления длины полигонов используется метод наименьшего повернутого прямоугольника, окружающего многоугольник (пакет вычислительной геометрии Shapely 1.6 Python).

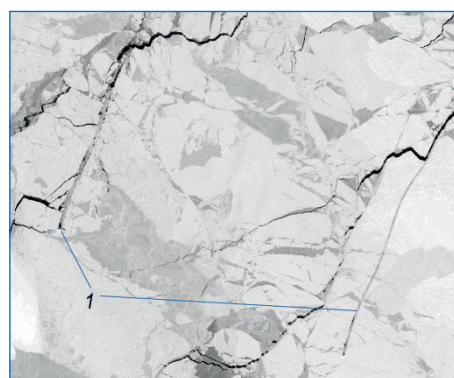


Пример определения на снимке Landsat-8 геометрических параметров разводий, включая длину, ширину и точки перегиба:

- а) фрагмент снимка; б) разводье на снимке (красный цвет);
- в) длина, ширина разводья и точки перегиба

Помимо оценки геометрических параметров разводий спутниковые снимки позволяют определить причину возникновения обнаруженных НСЛ — вызваны ли они атмосферным воздействием (прохождением циклонов и пр.), связаны ли с приливными явлениями или обусловлены взломом льда при ледокольной проводке. Отдельный случай представляют ситуации возникновения разводий, образующихся при воздействии дрей-

фующего ледяного покрова на айсберги, сидящие на мели. На спутниковом снимке при этом наблюдаются серии однонаправленных линий, исходящих из разных точек. Анализ серии последовательных снимков показывает, что в этих точках находятся айсберги, а сам район их нахождения представляет опасность для навигации. Особенно часто такие ситуации наблюдаются в западной части моря Лаптевых у побережья Северной Земли.



Пример обнаружения среди дрейфующих льдов разводий, образованных айсбергами (1), сидящими на мели. 15 марта 2022 года. Море Лаптевых

### Оценка торосистости морского ледяного покрова по спутниковым данным

Для обнаружения торосов на спутниковых снимках радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) применяется метод расчета текстурных характеристик (ТХ) для HH- и HV-каналов Sentinel-1 и выбор оптимальных ТХ. Текстурные характеристики вычисляются по методу

Характеристика по матрице совместной встречаемости уровней яркости (МСВ).

Алгоритм обнаружения торосов состоит из нескольких этапов:

- этап предварительной обработки,
- расчет дополнительных параметров PCA-изображения — текстурных характеристик,
- преобразование полученных ТХ в двоичную карту пикселей, маркирующих торосистые образования с помощью различных алгоритмов фильтрации,
- процедура обнаружения и сегментации, которая разбивает сеть пикселей двоичной карты на минимально возможные сегменты,
- алгоритм повторного объединения, где оценивается вероятность принадлежности различных сегментов к одному объекту, а затем все сегменты соединяются.

#### Предварительная обработка PCA-изображения

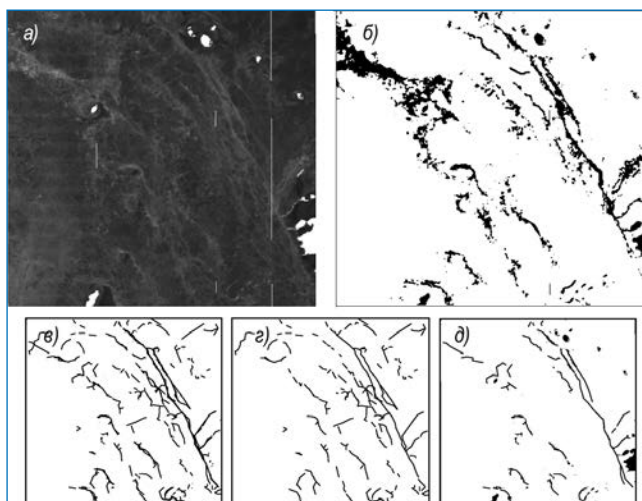
Предварительная обработка включает маскирование областей суши и коррекцию значений обратного рассеяния: для изображения в НН-поляризации для этого используется зависимость сигнала от угла падения, а для НВ-канала применяется процедура подавления шума по метаданным снимка. Полученные в результате значения удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) для обоих каналов нормируются в заданном диапазоне, определяемом по PCA-снимкам, выбранным для дальнейшего обучения алгоритма.

#### Расчет текстурных характеристик для скорректированных PCA-изображений

Для построения МСВ весь диапазон значений яркости PCA-изображения разбивается на интервалы — уровни квантования  $K$ , внутри которых все яркости считаются одинаковыми. МСВ строится для разных направлений ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ) и расстояний между соседними пикселями  $d$  в скользящем окне  $W$ . Для каждого направления с определенным расстоянием создается собственная матрица, в каждую ячейку  $(i, j)$  которой в качестве меры записывается вероятность того, что разделенные расстоянием  $d$  пиксели имеют яркости  $i$  и  $j$ . Размерность матрицы по вертикали и горизонтали равна числу использованных уровней яркости  $K$ . По каждой МСВ вычисляется несколько ТХ, затем скользящее окно смещается на шаг и расчеты повторяются. Текстуальные характеристики вычисляются для двух поляризационных каналов изображения по каждому направлению, каждая ТХ в дальнейшем подвергается осреднению по четырем направлениям. Шаг смещения скользящего окна определяется экспериментально.

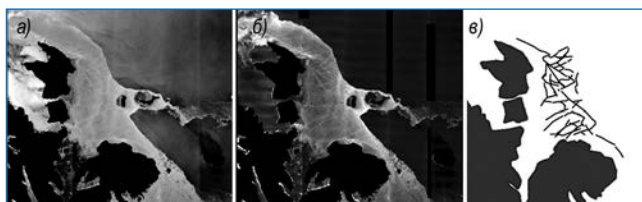
В процессе разработки метода выделения торосов определено два различных набора ТХ, содержащих оптимальное количество характеристик, в зависимости от сезона. Оба этих набора позволяли оптимизировать вычислительный процесс с обеспечением достаточной достоверности выделения торосов при необходимом быстродействии процесса.

На этапе фильтрации и обнаружения краев видимость более слабых зон деформации усиливается за счет эквализации гистограммы. На следующем шаге элементы деформации отделяются от фона. Для этого используется разностный фильтр Гаусса (Difference of Gaussians — DoG), позволяющий учитывать различные масштабы объектов. Фильтр DoG подавляет мелкомасштабный шум, а также крупномасштабные компоненты, представляющие однородные области изображения.



Пример определения торосов по PCA-данным Sentinel-1B от 09.04.2021 для НВ-поляризации. Арктический бассейн:

- а) — текстурная характеристика PCA-изображения после выравнивания гистограммы; б) — сегментированное бинарное изображение после фильтрации разностным фильтром Гаусса; в), г) и д) — обнаруженные объекты с разным значением  $I_{min}$



Пример определения торосов по PCA-данным Sentinel-1A (10.07.2015, Шлицберген):

- а) — НН-поляризация; б) — НВ-поляризация; в) — обнаруженные объекты

На этапе постобработки удаляют остаточный шум в виде несвязанных небольших отрезков. Минимальный размер обнаруженных объектов  $I_{min}$  может регулироваться пользователем. Сегменты-линии соединяются друг с другом, если разница в их ориентации менее  $10^\circ$ , а расстояние между конечными точками менее допустимого диапазона (4–5 пикселей). Длина объекта определяется подсчетом пикселей.

#### Выводы

– Построенные в автоматизированном режиме по спутниковым данным ледовые карты с нанесенными нарушениями сплошности и грядами торосов могут быть задействованы в оперативном режиме, в частности для прокладки маршрутов судов во время проводок.

– Полученные по спутниковым снимкам карты нарушений сплошности ледяного покрова могут использоваться для верификации методик прогнозирования НСЛ.

– Оперативные спутниковые данные о реальной ледовой обстановке в сочетании с прогностической информацией, а также данными об айсберговой опасности позволяют повысить эффективность плавания по СМП.

*Благодарности.* Часть исследований в данной работе выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 23-27-00122.

В.Г. Смирнов, И.А. Бычкова, Н.Ю. Захваткина, К.Г. Кортикова (АНИИ)