

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МОРСКОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ И СНИМКОВ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

Переход к круглогодичной навигации по Северному морскому пути требует более широкого внедрения автоматизированных методов обработки спутниковой информации в практику гидрометобеспечения деятельности в Арктике. Особое внимание при этом должно быть уделено методам обработки радиолокационной информации, не зависящей от условий естественной освещенности и от наличия облачности.

Разработанный в рамках проекта плановых научно-технологических работ Росгидромета «Программный комплекс автоматизированных методов оценки состояния морского ледяного покрова на основе снимков с Искусственных Спутников Земли, видимого и инфракрасного диапазонов и радиолокационных данных с различной поляризацией» (свидетельство о государственной регистрации № 2024687534 от 19 ноября 2024 года) включает 4 программы:

– «ТоросТХ» — оценка торосистости ледяного покрова по радиолокационным снимкам;

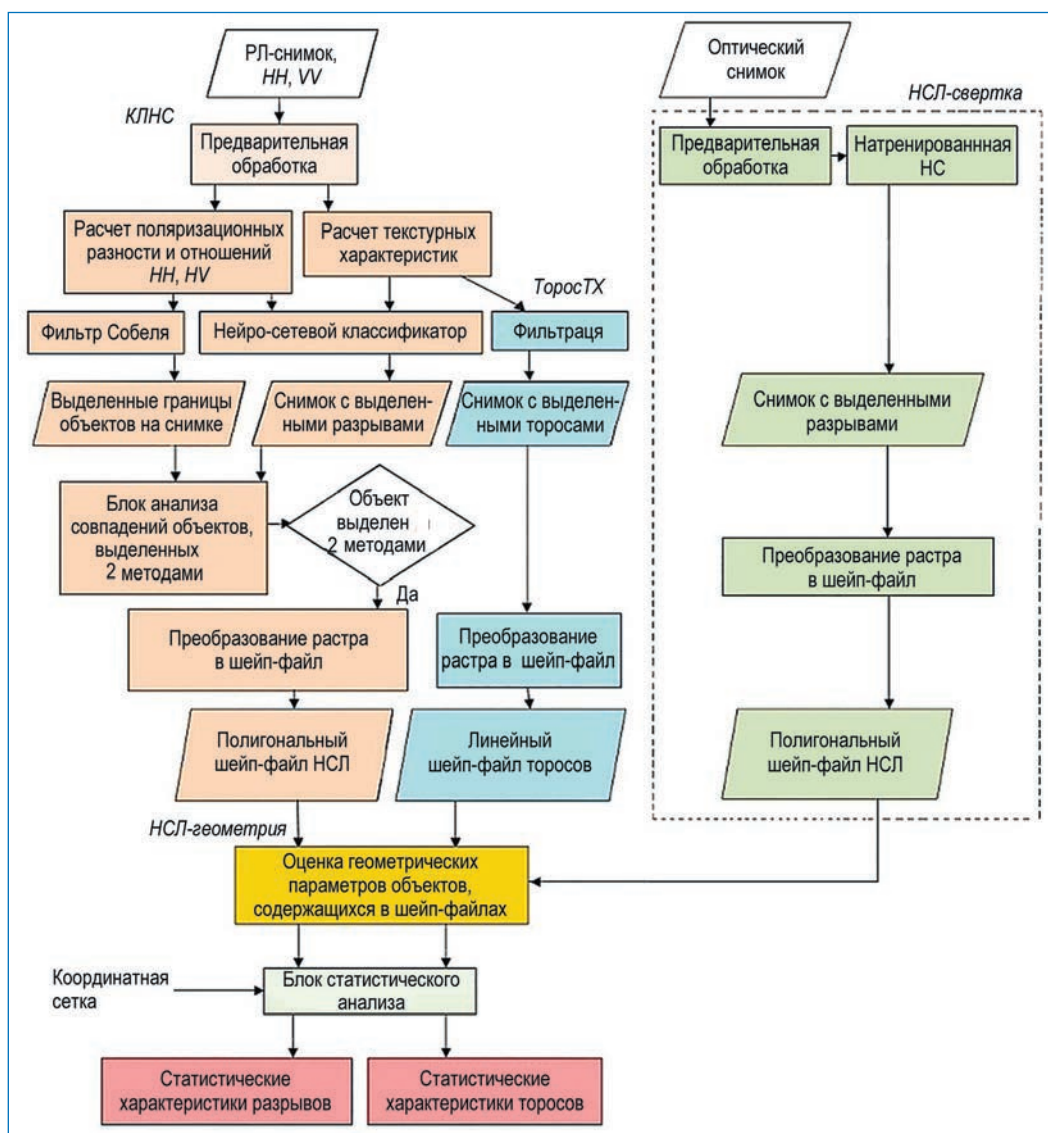
– «КЛНС» — оценка нарушений сплошности морского ледяного покрова на основе радиолокационных снимков;

– «НСЛ-свертка» — оценка нарушений сплошности морского ледяного покрова на основе снимков ИСЗ оптического спектрального диапазона с использованием метода сверточных нейронных сетей;

– «НСЛ-геометрия» — оценка геометрических параметров разрывов в ледяном покрове на основе спутниковых снимков.

Для интеграции разработанного ПО в единый программный комплекс создана отдельная программа «OSLIS\_Projects», предназначенная для вызова из главного меню программного обеспечения, разработанного в отделе совершенствования ледовой информационной системы ААНИИ. Программа «OSLIS\_Projects» написана на языке С#, предназначена для использования в операционной системе Windows и позволяет выполнить настройку и последующую загрузку до семи проектов. Для

Схема работы программного комплекса оценки состояния морского ледяного покрова по спутниковым снимкам



каждого проекта загружается среда исполнения и файл, управляющий выполнением программы (скрипт).

В результате работы программы «НСЛ-геометрия» на выходе получается информационная продукция в виде шейп-файлов карт торосов или разводий, в атрибутах этих файлов указываются геометрические параметры обнаруженных объектов: длина, ширина, направление распространения, точки перегиба. Такая информационная продукция поступает на вход блока статистического анализа, в котором происходит расчет плотности обнаруженных объектов в квадратах регулярной сетки  $25 \times 25$  км. Результаты расчета могут быть визуализированы с помощью цифровой шкалы плотности. Также определяется преобладающее направление разводий (торосов) в каждом квадрате сетки. В блоке статистического анализа может обрабатываться и иная спутниковая информация об объектах на морской поверхности, представленная в виде шейп-файлов, — в частности, данные об обнаруженных по спутниковым снимкам опасных ледяных образований.

### **Программное обеспечение оценки нарушений сплошности ледяного покрова по спутниковым радиолокационным данным («КЛНС»)**

Алгоритм автоматического обнаружения разводий основан на исследовании отраженного от поверхностей льда и открытой воды радиолокационного сигнала и анализе текстурных характеристик синтезированного изображения. Разрывы во льдах часто заполнены начальными видами льда и характеризуются на HV-поляризации очень низкими значениями сигнала, а окружающий лед — напротив, высокими значениями. Толстый/деформированный морской лед показывает другие поляризметрические характеристики по сравнению с более тонким морским льдом, увеличивая значения на кросс-поляризации и соотношение между кросс-поляризацией и ко-поляризацией.

Пространства чистой воды и начальных видов льда в ледяном покрове (разрывов, трещин и каналов) обнаруживаются методами нейронных сетей с использованием поляризационного отношения, поляризационной разности и текстурных характеристик как входных параметров.

В программе «КЛНС» спутниковые изображения изначально проходят предварительную обработку, включая удаление теплового шума, угловую коррекцию (приведение к общему углу падения) и удаление спекл-шума.

Важнейший блок ПО «КЛНС» — это блок «Нейросетевой классификатор». Для обучения сети выбирались данные PCA Sentinel-1 для Арктического бассейна (севернее Карского моря и моря Лаптевых) конца осени 2019 года и зимнего сезона 2019/20 года, содержащие в основном изображения однолетних и старых льдов. Процесс обучения нейросети (НС) состоит из нескольких этапов: подготовка снимков, разметка снимков с целью получения масок для обучения нейросети, само обучение. Обучение НС проводилось при помощи алгоритма обратного распространения ошибки, основанного на методе градиентного спуска с целью минимизации суммарной ошибки. Для обучения и применения нейросети использовались дополнительно статистические рассчитанные признаки PCA-изображения — текстурные характеристики (ТХ), вычисляемые на основе методики Харалика по матрице совместной встречаемости (МСВ) уровней яркости.

Для классификации лед-вода (разрывы) используется определяемый на стадии разработки набор ТХ, который выбирается исходя из оптимизации вычисли-

тельного процесса и обеспечении достаточной достоверности классификации при необходимом быстродействии процесса. Из всего набора ТХ (всего 26 для обоих поляризационных изображений) выбраны параметры расчета МСВ: уровень квантования  $K = 32$ , скользящее окно  $64 \times 64$  с шагом смещения 16 пикселей и расстоянием 16 пикселей, и набор из 9 ТХ: *HH* — второй угловой момент, контраст, дисперсия, суммарное среднее, суммарная энтропия; *HV* — второй угловой момент, момент обратной разности, суммарное среднее, энтропия.

Для повышения достоверности выделения нарушенной сплошности на PCA-изображениях дополнительно применяется расчет отношения и разности поляризаций. Поляризационное отношение *CR* рассчитывается как:  $CR = 10 \cdot \lg(\sigma_{HH}^{\circ} / \sigma_{HV}^{\circ})$ ; поляризационная разность (*PD*):  $PD = \sigma_{HH}^{\circ} - \sigma_{HV}^{\circ}$ , где  $\sigma_{HH}^{\circ}$  и  $\sigma_{HV}^{\circ}$  — значения УЭПР для *HH*- и *HV*-поляризации соответственно.

После расчета *PD* остается «шум» от незначительной разницы сигнала морского льда на двух поляризационных каналах, который уменьшается с помощью фильтра Гаусса.

Аналогичная процедура проводится при расчете поляризационного отношения *CR*. На этом этапе определяется пороговое значение для обнаружения разрывов — как локальный минимум по гистограмме распределения значений отношений *PD* и *CR*. По этому порогу выделяется множество неоднородностей ледяного покрова (разрывов / каналов / трещин и торосов), в том числе повторно замерзшие разрывы, покрытые более тонким молодым льдом или однолетним, так же как открытые водные пространства с начальными видами льда. После применения порога все значения обратного рассеяния ниже этой величины классифицируются как нарушения сплошности, а остальные — как лед, и все изображение переводится в бинарный формат.

Для выявления каналов с открытой водой используется алгоритм выделения краев с помощью фильтра Собеля.

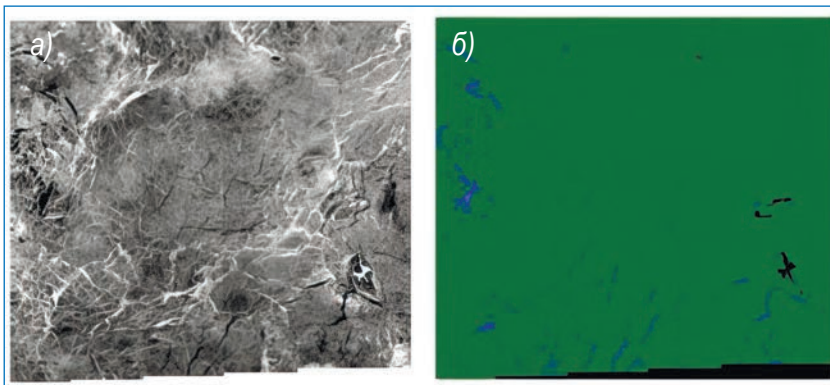
На последнем этапе работы ПО происходит объединение результатов нейросетевой классификации с результатами выделения краев оператором Собеля. Решение о принадлежности к классу «спокойная водная поверхность» принимается, если в области, выделенной оператором Собеля, количество пикселей этого класса, выделенного с помощью НС, превосходит количество пикселей другого класса. Такая область будет считаться разрывом, заполненным спокойной водой или ниласом.

Результатом классификации в ПО «КЛНС» является классифицированный снимок «лед-вода», сохраняющий исходную геопривязку снимка.

Валидация результатов обнаружения нарушений сплошности морского ледяного покрова по спутниковым радиолокационным снимкам выполнялась на основании визуальной интерпретации 10 сцен Sentinel-1, полученных в разное время. Ледовый эксперт построил для этих фрагментов схему разводий. Эта схема сравнивалась с результатами, полученными НС. Положение крупных разрывов (протяженностью несколько км и выше), определенных НС, совпало с данными эксперта. Точность обнаружения НСЛ с помощью ПО «КЛНС» составила 91 %.

### **Программное обеспечение оценки торосистости морского ледяного покрова по спутниковым радиолокационным снимкам («ТоросТХ»)**

В ПО «ТоросТХ» для обнаружения торосов на спутниковых двухполяризационных радиолокационных снимках применяется метод расчета текстурных характери-



Примеры обнаружения разводов на PCA-сцене Sentinel-1, 27 ноября 2021 года:  
 а) фрагмент скорректированного PCA-изображения — HH-поляризация;  
 б) классификация PCA-изображения: зеленый цвет — морской лед, синий цвет — разрывы

стик (TX) для HH- и HV-каналов и выбор оптимальных TX. Используя различные алгоритмы фильтрации для полученного поля TX, элементы деформации ледяного покрова отделяются от фона, что позволяет получить двоичную карту пикселей, маркирующих торосистые образования, и собственно шейп-файлы торосов.

### **Программное обеспечение оценки геометрических параметров разрывов в ледяном покрове на основе снимков ИСЗ («НСЛ-геометрия»)**

С помощью ПО «НСЛ-геометрия» по полигональному шейп-файлу разводов определяются геометрические параметры обнаруженных разрывов (или торосов): направление (ориентация), длина, ширина, точки перегиба.

**Ширина полигона.** Определяется с использованием метода скелетизации, при этом бинарное изображение преобразуется в скелетную форму. Скелет, представляющий собой набор точек, находящихся на медиальной оси геометрического объекта, позволяет эффективно вычислить длину и ширину полигона. Ширина полигона определяется как минимальное расстояние от каждой точки скелета до внешней границы полигона.

**Точки перегиба.** Определяются с помощью вычисления угла между тремя последовательными точками скелета. Для корректного определения точек перегиба

проводится оптимизация параметров сглаживания внешнего контура полигона и интерполяция точек на срединной линии.

**Длина полигона.** Определяется путем последовательного сложения расстояний между каждой парой соседних точек скелета. Расстояние между каждой парой точек находится по формуле Хаверсина (Haversine), учитывающей кривизну Земли.

**Ориентация разводов.** Определяется с помощью построения наименьшего повернутого прямоугольника (minimum rotated rectangle) и вычисления угла между направлением на север и длинной стороной повернутого прямоугольника.

моугольника.

В целом разработанный ПК показал свою работоспособность и возможность получать с помощью этого ПО оценку состояния морского ледяного покрова по спутниковым снимкам. Сложности в использовании ПК автоматизированных методов оценки состояния морского ледяного покрова в оперативной работе ААНИИ в настоящий момент связаны с отсутствием определенности в решении вопроса о том, данные каких ИСЗ могут рассматриваться как гарантированный источник бесперебойной оперативной спутниковой информации. Эти проблемы связаны с отсутствием в ААНИИ доступа к данным отечественных РЛ-спутников и санкциями со стороны недружественных стран в отношении потребителей спутниковой информации из РФ.

Построенные в автоматизированном режиме по спутниковым данным оперативные детальные ледовые карты с нанесенными зонами торосов и нарушениями сплошности (разводьями, трещинами, полыньями) могут быть использованы (при наличии необходимой спутниковой информации) для прокладки маршрутов судов во время проводок, а также в методиках прогнозирования НСЛ.

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