

В 2021 году описан алгоритм формирования ровного припайного льда в районе береговой линии. Нарастание льда у берега протекает по другому сценарию, чем нарастание льда на открытых участках акватории. Основными факторами, порождающими эти изменения, являются наличие прибрежных открытых трещин вдоль береговой линии и интенсивное снегонакопление в прибрежной полосе и в районе образовавшихся трещин.

Наличие открытых трещин вдоль береговой линии оказывает существенное влияние на формирование льда, порождая следующие ситуации:

- увеличивает динамичность ледообразования на нижней границе льда, что способствует образованию кристаллов внутриводного льда или обломков льда от соприкосновения краев трещины и приводит к нарастанию на нижней границе ледяного покрова льда генетического типа с более высоким динамическим индексом;

- изменяет тепловой баланс льда в районе трещины;

- способствует натеканию морской воды на поверхность льда при погружении кромки мористой части льда у трещины ниже уреза воды, что является одним из условий нарастания льда сверху в зимний период;

- в летний период способствует стоку талой воды с поверхности льда и снега.

Поверхность берега располагается выше поверхности воды, что способствует снегонакоплению на льду в районе береговой линии. При увеличении снега

в районе приливо-отливной трещины мористый край льда под тяжестью снега опускается ниже поверхности воды. Морская вода проникает через снежный покров и распространяется вдоль поверхности льда, смачивая снег и создавая слой водно-снежной смеси до места, где уровень воды совпадает с поверхностью льда. При замерзании водно-снежной смеси образуется слой льда сверху, над уровнем первоначальной поверхности льда. При повторении ситуации образуется новый слой водно-снежного льда над ранее сформированным. Таким образом, лед сверху нарастает послойно, пока этот процесс повторяется.

Лед в районе береговой линии в местах аккумуляции снега формируется из двух основных слоев: льда, выросшего сверху, и льда, выросшего снизу. Условия ледообразования этих слоев различны, что приводит к различиям в кристаллическом строении и текстуре. В количественном отношении толщина этих слоев меняется по мере удаления от приливной трещины. В районе приливной трещины толщина льда, выросшего сверху, максимальная и может значительно превышать толщину льда, выросшего снизу. По мере удаления от приливной трещины соотношение слоев изменяется с преобладающим преобладанием льда, выросшего снизу, до полного исчезновения слоя, выросшего сверху. Расстояние, на котором наблюдается отсутствие слоя, выросшего сверху, может быть принято за границу влияния формирования льда под действием снегонакопления у берега.

С.М. Ковалев (АНИИ)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ НАРУШЕНИЙ СПЛОШНОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Представлены промежуточные итоги по результатам разработки автоматизированных методов оценки состояния морского ледяного покрова, на основе снимков ИСЗ видимого и ИК-диапазонов и радиолокационных данных с различной поляризацией. Тема исследований имеет непосредственное практическое значение. В условиях роста трафика по СМП, проведения масштабных работ по освоению месторождений углеводородного сырья в мелководной зоне арктических морей возрастает потребность в достоверной оперативной информации и надежных краткосрочных прогнозах о состоянии ледяного покрова и наличии благоприятных для ледового плавания районов нарушений сплошности. В связи с ожидаемым переходом на круглогодичную навигацию по СМП потребуются ускоренное создание новых технологий в области мониторинга состояния морского ледяного покрова и прогнозирования ледовых условий. Основным источником данных для таких технологий станет спутниковая информация, полученная как в оптической зоне, так и по радиолокационным снимкам. В настоящее время на уровне Правительства РФ поставлена задача улучшить качество прогнозирования ледообразования на СМП, в том числе за счет использования алгоритмов машинного обучения по распознаванию спутниковых радиолокационных снимков.

Обнаружение нарушений сплошности ледяного покрова по оптическим снимкам

Из-за ограничений по естественной освещенности в Арктике в зимний период (октябрь — начало марта) в оптическом диапазоне для мониторинга ледовой обстановки со спутников используются только тепловые ИК-снимки. В остальное время используются и снимки видимого диапазона, имеющие лучшее пространственное разрешение по сравнению с инфракрасными. Оперативная информация видимого и ИК-каналов доступна в настоящее время со спутников Landsat-8, Sentinel-2, Terra/MODIS, Suomi-NPP. Из отечественных спутников в этих диапазонах можно применять снимки ИСЗ серии «Канопус», «Ресурс-П», «Метеор», «Арктика-М». Для обнаружения нарушений сплошности ледяного покрова (НСЛ) на снимке видимого диапазона могут применяться как градиентный метод поиска аномалий сигнала, так и метод бинаризации сигнала с классификацией изображения на зоны «лед» — «вода».

Алгоритм обнаружения НСЛ по оптическим снимкам с бинаризацией сигнала включает несколько этапов: выделение зон суши; создание облачной маски; сегментация снимка на зоны с разным порогом яркости; бинаризация изображения с подготовкой файла «лед — вода». Зоны

суши исключаются из расчета путем загрузки из базы данных шейп-файла береговой линии исследуемого района.

Создание облачной маски

Для обнаружения НСЛ на оптических снимках предварительно должны быть выделены и исключены из дальнейшего анализа зоны моря, в которых облачность полностью экранирует излучение от морской поверхности. Также необходимо выделить зоны полупрозрачной облачности, по которым информация о характеристиках НСЛ может быть получена. Облачная маска создается путем использования изображений, полученных в видимой и ближней ИК-областях спектра, а также снимка теплового диапазона.

Снимок теплового ИК-канала позволяет выделить холодные облака, температура которых ниже, чем температура ледяного покрова на этом же снимке. Снимок в узком диапазоне 1,36–1,39 мкм Landsat-8 позволяет выделить перистые облака; иные объекты в этом канале не видны. По снимку в ближневолновом ИК-диапазоне

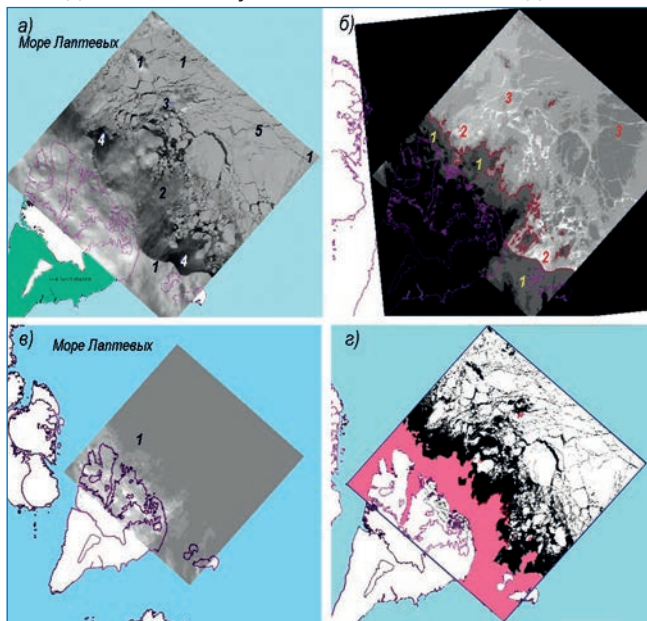


Рис. 1. Нарушения сплошности ледяного покрова, выделенные по снимку с Landsat-8 за 21 апреля 2021 года. Район моря Лаптевых.

а) исходный снимок, панхроматический диапазон: 1 — сплошная облачность; 2 — перистые облака; 3 — тень от облаков; 4 — открытая вода; 5 — разводья; б) снимок в тепловом ИК-диапазоне: 1 — холодная облачность; 2 — открытая вода (полюны); 3 — разводья; в) снимок в канале 1,36 – 1,39 мкм: 1 — облачность; г) бинаризованный снимок с нанесенной облачной маской: красный цвет — итоговая облачная маска, построенная по данным разных каналов.

выделяется яркая облачность. Облачные зоны, выделенные в трех каналах, образуют облачную маску (рис. 1).

Сегментация оптического спутникового снимка на зоны с разной величиной порога яркости для разделения классов «лед—вода».

После выделения на снимке объектов суши, участков моря со сплошной облачностью и участков открытой воды на оставшейся части снимка, содержащей изображение ледяного покрова, выделяют зоны, для которых применяется разная величина порога «лед—вода». При сегментации выявляют зону сплошного ледяного покрова с НСЛ; зону полупрозрачного облачного покрова (при наличии); зону теней от отдельных облаков (при наличии).

Подготовка бинарного файла «лед—вода».

Пороговая яркость для выделенных зон определяется по гистограмме сигнала во фрагменте снимка с использованием метода Отсу. По установленным по-

рогам яркости исходное изображение бинаризуется и содержит 2 класса: лед и вода (рис. 1г).

Далее по бинарному изображению готовится полигональный шейп-файл разводий.

Детектирование разрывов во льду по радиолокационным данным с использованием текстурных характеристик

Алгоритм автоматического обнаружения НСЛ на изображениях радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) основан на исследовании отраженного от поверхностей льда и открытой воды радиолокационного сигнала и анализе текстурных характеристик изображения. Измеряемой характеристикой обратного рассеяния является удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР, σ°), выраженная в дБ.

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 поляриметрические характеристики по сравнению с более тонким морским льдом, увеличивая значения на кросс-поляризации и соотношение между кросс-поляризацией (HV) и кополяризацией (HH).

Пространства чистой воды и начальных видов льда в НСЛ (разрывов, трещин и каналов) обнаруживаются методами нейронных сетей (НС) с использованием признаков, полученных в результате анализа поляризационного отношения в разных поляризационных каналах (HH, HV), поляризационной разности в тех же каналах и текстурных характеристик. Классификатор учитывает 6 оптимальных текстурных характеристик из общего набора, составляющего 26 характеристик.

Поляризационное отношение (CR):

$$CR = 10 \cdot \log_{10}((\sigma_{HH}^\circ)/(\sigma_{HV}^\circ))$$

Поляризационная разность (PD):

$$PD = \sigma_{HH}^\circ - \sigma_{HV}^\circ$$

В исследовании используются PCA-изображения, полученные со спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B в режиме сверхширокой полосы обзора (Extra Wide, EW) с HH и HV поляризациями. Продукты уровня L1 с наземным обнаружением среднего разрешения (GRDM) обеспечивают охват полосы 410 км, полученной в пяти полосах обзора с размером пикселя 40 м.

Алгоритм оценки НСЛ по данным РСА состоит из последовательных процедур, начиная от предварительной обработки и до классификации с помощью нейросетевого метода.

Предварительная обработка

Спутниковые изображения проходят предварительную обработку, включая удаление теплового шума, угловую коррекцию (приведение к общему углу падения) и удаление спекл-шума. Угловая коррекция заключается в компенсации влияния угла падения на значения интенсивности сигнала на HH-канале.

После угловой коррекции производят коррекцию шума на изображении. РСА-данные, получаемые в режиме широкой полосы обзора EW для Sentinel-1, формируются из более узких полос EW1–EW5, что на HV-поляризации вызывает видимые флуктуации интенсивности как внутри полос, так и на их смежных границах в направлении по дальности РСА-изображения. Внутри полос по азимутальному направлению существует еще специфический вид шума — так называемый «гребешковый» эффект. Для

уменьшения этого шума применяется сглаживание изображения по полосам обзора и их границам: удаление флуктуаций яркости в направлении по азимуту и дальности по методике, предложенной Европейским космическим агентством (ЕКА). Из значений интенсивности сигнала вычитаются значения шума, предоставляемые во вспомогательных метаданных для каждого РСА-снимка. Это улучшает качество изображения, но в полосе EW1 сохраняется значительный остаточный шум. Информация о границах диапазонов EW1–EW5 извлекается из вспомогательных метаданных снимка. По стандартному алгоритму шумоподавления ЕКА, значения σ° на HV-поляризации с фиксированными шагами пикселей извлекаются в направлении по дальности РСА-изображений для EW1 и EW2 + EW3. Затем отношения для каждой пары (EW1 против EW2 + EW3) вычисляются и усредняются. Этот динамический усредненный коэффициент применяется для коррекции значений σ° полосы EW1.

Процедура подавления шума существенно влияет на значения обратного рассеяния начальных видов льда / темного ниласа и особенно невзволнованной водной поверхности, создавая отрицательные значения, поэтому в анализ включают минимально допустимый уровень шума. Затем спекл-шум изображения уменьшается с помощью применения фильтра Гаусса. На этом этапе также применяется маскирование областей суши, которые в дальнейших расчетах не участвуют. Значения УЭПР в дБ для обоих каналов нормируются в заданном диапазоне. Диапазон определяется непосредственно по РСА-снимкам, выбранным для дальнейшего обучения алгоритма, путем построения гистограмм распределения значений УЭПР для каждого снимка и выбора минимального и максимального значения УЭПР по средним минимумам и максимумам всех снимков.

Примеры использования радиолокационных данных для обнаружения НСЛ

В ноябре 2021 года из-за ранних сроков образования ледяного покрова в ледовый плен на трассе СМП попали более 20 судов. РСА-изображения Sentinel-1 были использованы для обнаружения НСЛ, которые могли бы быть рекомендованы судоводителям для вывода судов из районов тяжелой ледовой обстановки, не прибегая к ледокольной проводке.

Классифицированные снимки (рис. 2) иллюстрируют тяжелую ледовую обстановку, сложившуюся в этом районе СМП в конце ноября. Практически вся акватория уже покрыта льдом, пространства чистой воды и разводий занимают крайне малый процент, безледокольная проводка судов не реальна. Снимок от 1 декабря, классифицированный методом НС, показал, что тяжелые ледовые условия сохраняются, транспортные суда не имеют возможности самостоятельно продолжить движение.

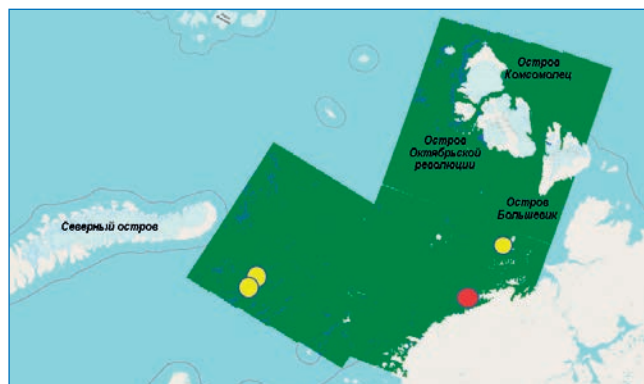


Рис. 2. Композиция трех классифицированных РСА-изображений Sentinel-1 от 27.11.2021 года, Карское море и море Лаптевых. Точками обозначено положение судов, оказавшихся в ледовом плену. Цвета: зеленый — лед, синий — разрывы, заполненные водой или начальными видами льда

Приведенный пример подчеркивает важность организации в период ледообразования спутникового радиолокационного мониторинга акватории СМП на ежесуточной основе. Реализации такого плана мешает пока отсутствие в РФ собственных радиолокационных спутников природо-ресурсного назначения. Вместе с тем хорошие перспективы для мониторинга нарушений сплошности ледяного покрова связаны в РФ с эксплуатацией КА «Арктика-М», запущенного на высокоэллиптическую орбиту в феврале 2021 года «Арктика-М» позволяет обеспечить в течение суток многократную съемку одного и того же участка российской Арктики в оптическом диапазоне, что даст возможность построения композитных карт ледяного покрова за одни сутки по большей акватории, открытой от облачности (с учетом облачной динамики). Также повысится точность построения полей скорости льда, картирования разрывов, прогноза зон сжатия ледяного покрова, учитывая высокую скорость изменчивости процессов сжатия.

Выводы

Построенные в автоматизированном режиме по спутниковым данным детальные ледовые карты с нанесенными нарушениями сплошности (разводьями, трещинами, полыньями) могут быть задействованы в оперативном режиме, в частности для прокладки маршрутов судов во время проводок.

Спутниковые карты НСЛ могут использоваться для верификации методик прогнозирования НСЛ.

Наличие оперативных спутниковых данных о реальной ледовой обстановке и прогностической информации о НСЛ позволит существенно повысить эффективность плавания по СМП.

*В.Г. Смирнов, И.А. Бычкова,
Н.Ю. Захваткина (АНИИИ)*

ОСОБЕННОСТИ КЛИМАТА АРКТИКИ В 2021 ГОДУ

Изменения климата в Арктике привлекают особое внимание в связи с усилением здесь глобального потепления и таянием морских льдов. В слежении за изменениями важная роль принадлежит наблюдениям на метеорологических станциях, большая часть которых поддерживается Росгидрометом. При оценке температуры к Арктике обычно относят область севернее 60° с. ш. Акватория Северного Ледовитого океана с мор-

ским льдом на поверхности занимает область севернее 70° с.ш., поэтому мы оцениваем температуру и в этой области, а также в области максимального распространения морского льда (морская Арктика).

Температуры воздуха в северной полярной области (СПО) и в арктических морях по данным 250 метеорологических станций (рис. 1) понизилась по сравнению с 2020 годом, и 2021 год оказался среди не самых теплых