УДК 551.467
DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071

МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ КАРТ ААНИИ

Е.В. Афанасьева[1], Т.А. Алексеева[1], Ю.В. Соколова[1], Д.М. Демчев[1], М.С. Чуфарова[1], Ю.Д. Быченков[1], О.С. Девятаев[1]

[1]Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

✉ *afanasieva@aari.ru, taa@aari.ru, j.sokolova@aari.ru, denis.demchev@aari.ru, chufarova@aari.ru, ydb@aari.ru, osd@aari.ru*

Ледовые карты Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) широко используются для ряда научных и практических задач, однако до сих пор не была опубликована подробная и обобщенная информация о методах их составления. В данной статье сотрудниками центра «Север» ААНИИ, непосредственно занимающимися составлением ледовых карт в настоящее время, описаны особенности методики и используемые для картирования данные. Представленный в статье обзор полезен для корректного применения ледовых карт пользователями для своих научных и практических задач.

Ключевые слова: Арктика, дешифрирование морского льда, морской лед, сплоченность, возраст морского льда, ледовая карта, ААНИИ, ледовый эксперт, ледовая служба.

AARI METHODOLOGY FOR SEA ICE CHARTS COMPOSITION

E.V. Afanasyeva[1], T.A. Alekseeva[1], J.V. Sokolova[1], D.M. Demchev[1], M.S. Chufarova[1], Yu.D. Bychenkov[1], O.S. Devyataev[1]

[1]Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg

Sea ice charts of the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) are widely used nowadays for a variety of scientific and practical tasks. However, detailed description of ice charts composition still has not been published. In this paper, staff members of the Russian Ice Service (Center “Sever”, AARI), directly involved in ice charts composition, give information about sea ice analysis method-ology and the data they use. Information presented is necessary for a correct ice charts use for different needs.

Keywords: Arctic, sea ice analysis, sea ice concentration, sea ice age, sea ice chart, AARI, sea ice expert, ice service.

Краткий обзор ледовых служб, занимающихся морями Северного Ледовитого Океана (СЛО).

Оперативным мониторингом морского льда на акватории СЛО в настоящее время занимаются ледовые службы пяти приарктических государств: России, Канады, США, Дании и Норвегии [1]. Наблюдения за ледовой обстановкой ведутся круглый год, и на их основе составляются ледовые прогнозы различной заблаговременности.

Информация, предоставляемая ледовыми службами, различается по своему составу и районам. Так, Датский метеорологический институт (DMI – Danish Meteorological Institute) ведёт мониторинг вод вокруг Гренландии, и на ледовые карты наносятся границы зон одинаковой сплочённости, возрастного состава дрейфующего льда, границы припая, а также наличие льда материкового происхождения (айсберги). Норвежский метеорологический институт (MET.NO – Norwegian Meteorological

Institute) отслеживает ледовую обстановку на европейской части СЛО. На ледовых картах отображается только общая сплочённость дрейфующего льда и границы припая. Канадская ледовая служба (CIS – Canadian Ice Service) выпускает ледовые карты своих территориальных вод, расположенных вдоль арктического и северо-восточного побережий Северной Америки, а также в проливах Канадского Арктического архипелага. Карты содержат информацию о сплочённости, возрастном составе дрейфующего льда, а также положении границ припая. Национальный ледовый центр США (NIC – National Ice Center) производит мониторинг всего Северного Ледовитого океана вместе с прилегающими замерзающими акваториями Тихого океана и Северной Атлантики. Региональные ледовые карты вод, омывающих полуостров Аляска, составляются Национальной службой погоды США (NWS – National Weather Service). На картах NIC и NWS указывается сплочённость и возраст льда. Центром «Север» Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) выпускаются ледовые карты морей европейской и амеразийской частей Арктики с указанием общей сплочённости льда в летние месяцы (с июня по сентябрь) и возрастного состава в зимние месяцы (с октября по май). Кроме того, производится картирование ледяного покрова замерзающих морей Тихого океана, а также внутренних морей, граничащих с территорией России. Момент перехода с зимнего режима картирования на летний в этих морях наступает раньше, чем в арктических, что обусловлено более ранним наступлением сезона таяния. Помимо сплочённости и возраста, на картах обозначаются границы припая и некоторые опасные объекты – зоны риска встречи с айсбергами и стамухи. Следует отметить, что помимо ледовых карт, службами Канады, США и Дании также регулярно составляются карты распределения айсбергов в районе Гренландии и Северной Атлантики. Ледовые службы России, США и Норвегии ведут постоянный мониторинг вод не только арктических морей, но и морей Антарктики. Примеры карт, составленных иностранными ледовыми службами, приведены на Рисунке 1. Примеры ледовых карт ААНИИ разных лет будут приведены в следующих разделах.

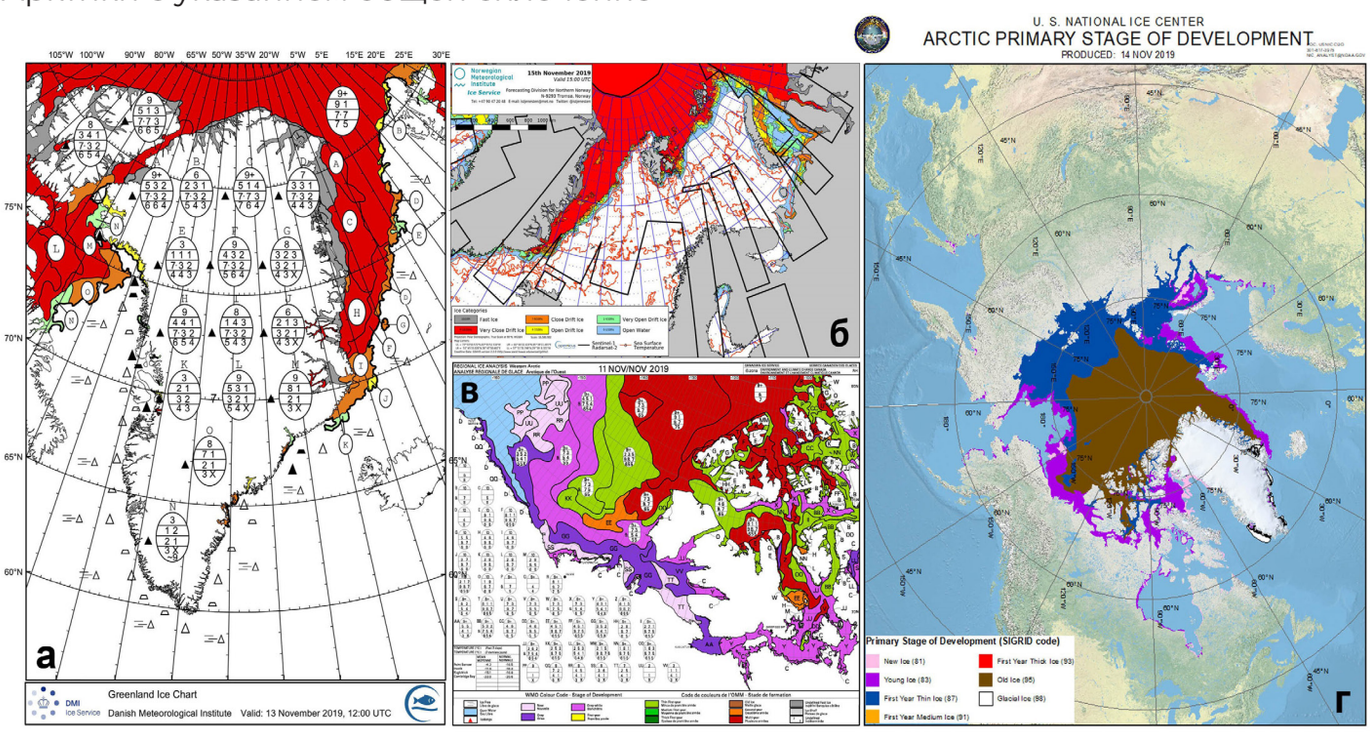

Рисунок 1 – Примеры ледовых карт, составленных ледовыми службами Дании (а) [2], Норвегии (б) [3], Канады (в) [4] и США (г) [5].

История ледового картирования в ААНИИ.

История ледового картирования в ААНИИ берёт начало с середины 20-х годов XX века, когда начались эпизодические ледовые авиаразведки в Арктике. С 1929 г. полёты стали регулярными в Карском море, а с 1935 г. – в море Лаптевых. С 1938 г. пионерский период авиаразведки льдов закончился, и авиационные наблюдения стали выполняться регулярно по всей трассе Северного морского пути (СМП), и не только в навигационный период [6, 7]. В ходе первых авиаразведок данные о состоянии ледяного покрова наносились наблюдателем на бумажный бланк непосредственно на борту во время полёта. На Рисунке 2 представлена карта ледовых условий вблизи берега Харитона Лаптева (Карское море), выполненная во время авиаразведки 9 сентября 1934 г. Видно, что наблюдатель фиксировал только самые общие особенности, такие как положение границы припая и кромки дрейфующего льда, наличие ледяных полей и их общую сплочённость. Наблюдателем отмечена полынья вдоль побережья, за полыньёй - зоны разреженного и сплочённого льда, припай в архипелаге Норденшельда. Следует отметить, что официально признанной символики для ледовых карт в тот ранний период ещё не было, поэтому условные обозначения хоть и понятны, но во многом отличаются от современных.

Позднее, помимо визуальных наблюдений, стали выполняться инструментальные измерения параметров ледяного покрова. Сначала они ограничивались средствами аэрофотосъёмки, а затем с начала 1950-х по 1980 гг. был протестирован и с разным успехом внедрён в практику ряд приборов, включавший в себя панорамные радиолокационные станции, авиационные ИК-радиометры (ИК – инфракрасный диапазон),

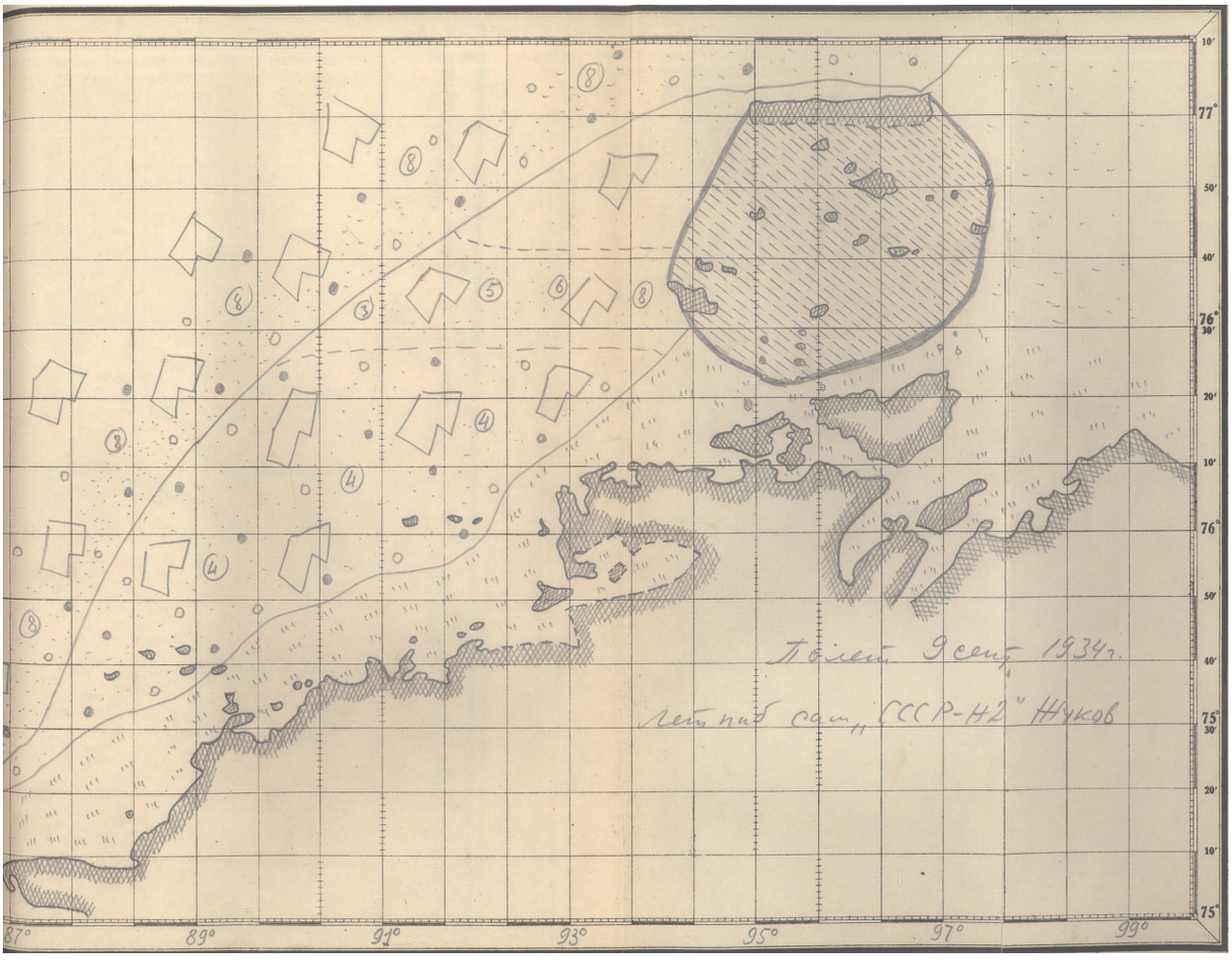

Рисунок 2 – Карта ледовой обстановки вдоль Таймырского побережья между бухтой Михайлова и Таймырским заливом (берег Харитона Лаптева), Карское море. Карта выполнена в ходе ледовой авиаразведки 9 сентября 1934 г. и хранится в фондах ААНИИ.

радио-локационные станции бокового обзора (РЛС БО), радиолокационные измерители толщины льда, лазерные профилографы и СВЧ-радиометры (СВЧ – сверхвысокочастотный диапазон) [8, 9]. Собранные в ходе облётов инструментальные данные использовались ледовыми экспертами для анализа ледовой обстановки. Применение инструментальных методов дало возможность расширить ряд наблюдаемых параметров, что потребовало усовершенствования действовавшей до сих пор классификации морских льдов, принятой в 1954 г. Новая версия номенклатуры [10], которая используется по настоящее время, была утверждена в 1971 г. Это позволило унифицировать обозначение на картах таких характеристик льда как возраст, размер ледяных образований, степень торосистости и наслоенности, стадия таяния, заснеженность, наличие и ориентация трещин и разводий, наличие сжатий, присутствие опасных ледовых объектов и др. Важно отметить, что российская ледовая символика существенно отличается от принятой Всемирной метеорологической органи-зацией (ВМО) [11]; однако качественно классификация льда идентична. Фактически, отличается только способ отображения ледовой информации на карте.

Параллельно с развитием инструментальных методов в Советском Союзе и за рубежом велись разработки первых метеорологических космических аппаратов (КА). Первый опыт использования спутниковой информации при составлении ледовых карт был получен сотрудниками ААНИИ в 1966 г. по данным американского спутника ESSA-2 и отечественного КА Космос-122. Однако, этот опыт имел больше исследовательский характер, поскольку получение изображений в оперативном режиме на тот момент было невозможным. Использование спутниковой информации при оперативном картировании льда началось в 1968 г. с появлением первой приёмной станции, самостоятельно сконструированной специалистами ААНИИ для приёма изображений КА ESSA-2 и ESSA-6. С 1975 г. начался регулярный приём информации с нового отечественного спутника Метеор-2. Запись изображений в то время производилась на фотоплёнку. После проявки кадр закладывался в фотоувеличитель и проецировался на бумажную бланковую карту, на которую карандашом наносились границы ледовых зон. Проецированием осуществлялась геопространственная привязка снимка [12].

На протяжении около десяти лет спутниковые изображения служили информацией, лишь дополняющей имевшийся на тот момент комплекс инструментальных авиационных наблюдений, и вплоть до 1979 г. карты фактически строились на основе данных визуальной авиаразведки [7].

Активное внедрение спутниковых данных в оперативную практику началось в 80-х годах XX века. С 1983 г. начали проводиться ежегодные полигонные наблюдения в районе острова Жохова (Восточно-Сибирское море) с целью изучения возможности комплексного использования авиа- и спутниковых наблюдений, а также уточнения дешифровочных признаков льда по натурным измерениям. По результатам экспедиций составлялись и уточнялись руководства по дешифрованию льда по спутниковым изображениям. В те же годы специалистами ААНИИ организовывались автономные пункты приёма спутниковой информации (АППИ) на дрейфующих станциях «Северный полюс» (СП) с целью сбора данных по всему Арктическому бассейну, так как приёмная станция, расположенная в Санкт-Петербурге (Ленинграде в то время), обеспечивала покрытие данными только в Гренландском, Баренцевом и Карском морях. Карты восточного сектора Арктики составлялись специалистами непосредственно на дрейфующей станции и направлялись в ААНИИ для составления сводной карты СЛО.

Таким образом, в период с 1980 по 1989 гг. [7] состав наблюдений за ледяным покровом достиг своего максимума. С одной стороны, имелась уже хорошо отлаженная и устоявшаяся система

инструментальных измерений, с другой стороны, к этому времени, был уже довольно хорошо изучен потенциал спутниковых данных для задач ледового картирования. Пример карты, составленной в этот период приведён на Рисунке 3. Карта взята из Отчёта о научно-оперативном обеспечении зимнего плавания судов в западном районе Арктики, составленного группой Диксонского управления по гидрометеорологии и контролю природной среды (периферийного центра ААНИИ) по итогам зимнего сезона 1983/84 г. [13]. В отчёте указано, что ледовые карты строились по данным как авиационных, так и наземных визуальных наблюдений, данным контактных и дистанционных измерений толщины льда, изображениям авиационных и космических РЛС БО, а также спутниковым данным в видимом и ИК диапазонах электромагнитного спектра. В ходе авиаразведок на острове Диксон также шло уточнение дешифровочных признаков

Рисунок 3 – Карта ледовой обстановки в Карском море в период с 14 по 16 мая 1984 г. Карта составлена по данным визуальных и инструментальных наблюдений авиаразведки с привлечением спутниковой информации [13]. Карта хранится в фондах ААНИИ.

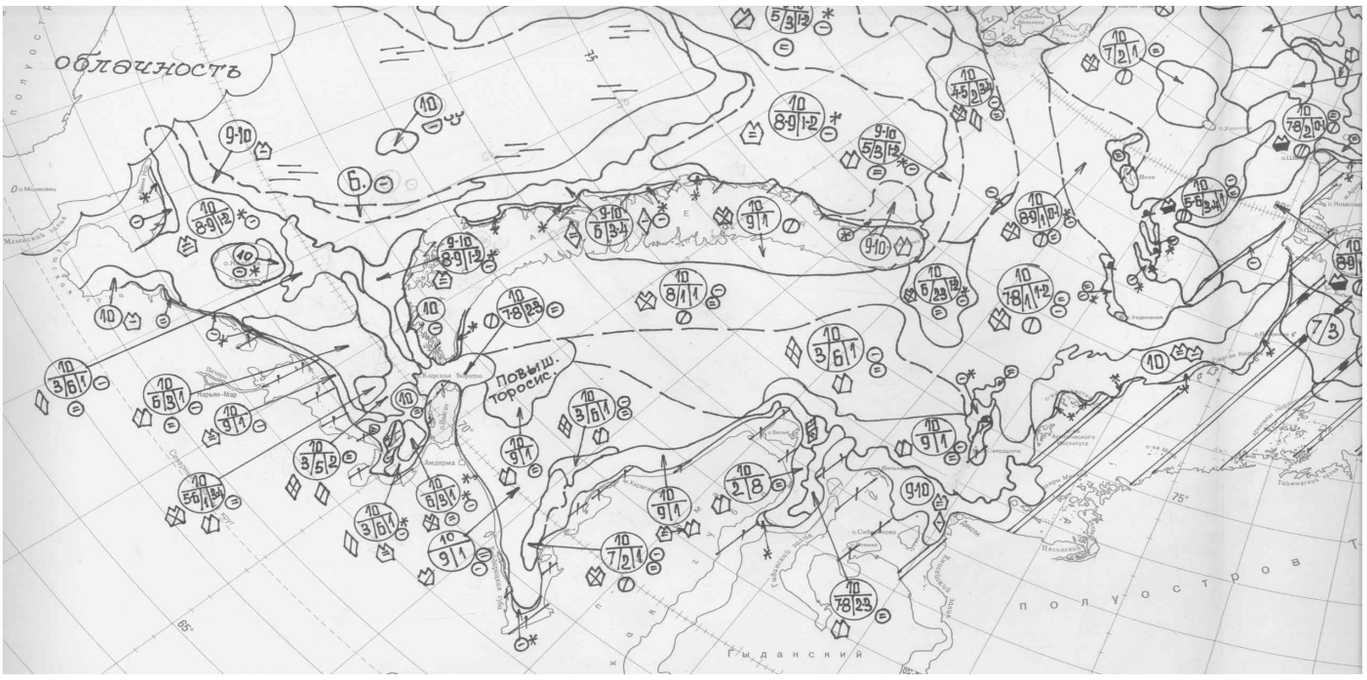

Рисунок 4 – Фрагмент сводной ледовой карты СЛО (Баренцево и Карское моря) за период с 15 по 19 февраля 1997 г. Составлена по данным дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ). Карта хранится в фондах ААНИИ.

льда на спутниковых изображениях.

С 1990 г. ледовая авиаразведка в ААНИИ прекратила своё существование, и с этого момента по сегодняшний день картирование льда производится только по спутниковым данным [7]. Многолетний опыт авиа-разведки лёг в основу интерпретации спутниковых изображений, получаемых в различных диапазонах электро-магнитного спектра. Так, интерпретация радиолокационных спутниковых снимков основывается на опыте работы с РЛС БО [8, 9]. Принципы дешифрирования льда на снимках в видимом и ИК диапазонах основаны на опыте визуальных авиационных наблюдений [12] и авиатермосъёмки [9].

Прежде чем приступить к описанию картирования льда в наши дни, следует отметить ещё некоторые важные моменты. В середине 1990-х гг. для записи спутниковых изображений перестала использоваться фотоплёнка, и информация в цифровом формате начала выводиться на экран. Однако ледовые карты продолжали выпускаться на бумажных бланках вплоть до начала 2000-х гг. (Рисунок 4), поскольку ещё не были разработаны необходимые инструменты для создания их в цифровом виде. Создание инструментов для автоматизированного рабочего места (АРМ) «Эксперт ледовой карты» было завершено в 2006 г., что позволило полностью перейти к использованию ГИС-технологий и оцифровке карт.

Ледовое картирование в ААНИИ в наши дни (начало XXI века).

Внедрение ГИС-технологий (ГИС – географическая информационная система) позволило перейти к выполнению всех этапов создания карт в интерактивном режиме. Для этой цели в ААНИИ с начала 2000-х гг. использовались разные поколения геоинформационного программного обеспечения компании ESRI CIS. В настоящее время весь процесс создания ледовой карты осуществляется в системе ArcGIS версии 2010 г. Дополнительный набор инструментов для АРМ «Эксперт ледовой карты» позволяет с помощью инструментов графики выделять однородные ледовые зоны на геопривязанных спутниковых изображениях с последующим преобразованием замкнутых контуров (границ выделенных зон) в полигональные объекты в виде векторного файла (формат ESRI Shape-file). Затем выделенным зонам в интерактивном режиме (с возможностью редактирования)

присваиваются атрибутивные данные с помощью специального диалогового окна. В соответствии с атрибутами, карта, состоящая из ледовых зон, автоматически представляется в российской или международной символике. Для хранения и передачи данных АРМ включает в себя инструменты для приведения структуры атрибутивной таблицы векторной ледовой карты к стандарту ВМО SIGRID-3 [14], а также для конвертации векторных ледовых карт из формата ESRI Shape-file в форматы электронных картографических навигационно-информационных систем (ЭКНИС), например, в формат S-57. Ранняя версия АРМа описана в монографии Remote sensing..., 2007 [15].

1. Исходная информация.

В настоящее время основным, а зачастую и единственным источником информации о состоянии ледяного покрова являются спутниковые изображения, регулярно (несколько раз в сутки) покрывающие всю площадь Арктического бассейна. При составлении ледовой кары эксперт анализирует различные виды спутниковых данных: данные оптической съёмки, активной радиолокации, пассивной радиометрии и др. Общие принципы этих дистанционных методов, а также влияние параметров льда на формирование изображений подробно изложены в монографиях Спутниковые методы..., 2011 и Sea Ice: Physics and..., 2015 [16, 17].

Данные тринадцати метеорологических спутников поступают на пункты приёма информации ААНИИ в режиме непосредственной передачи [18]. С 1996 г. данные спутников серии NOAA принимаются антенной, расположенной на крыше здания ААНИИ в Санкт-Петербурге. Здесь же с 2004 по 2017 г. осуществлялся приём информации со спутника Terra. С 2013 года антенный комплекс в посёлке Баренцбург (арх. Шпицберген) непрерывно ведёт приём и автоматическую обработку данных в видимом и ИК диапазонах со спутников NOAA, MetOp, Terra, Aqua, Suomi NPP, Fengyun, которые затем в готовом виде поступают к ледовым экспертам для дальнейшего анализа. При составлении ледовых карт используются также радиолокационные изображения спутников Sentinel-1 и данные пассивной радиометрии AMSR2 из открытых источников. Мониторинг льда в акваториях, расположенных вне зоны охвата антенн (морях Дальнего Востока России), полностью ведётся по открытым данным [19-22].

Для построения обзорных региональных карт, доступных на официальном сайте ААНИИ [23] и в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду [24], используется информация, собранная за 2-3 суток, поскольку получить ледовую карту целого бассейна за одни сутки, как правило, невозможно из-за наличия облачности на оптических снимках и неполного суточного покрытия акватории радарными данными. Обобщение спутниковой информации за 2-3 суток даёт возможность составить обзорную карту, которая, как мозаика, состоит из отдельных частей, привязанных к разным моментам времени. Более свежая информация находится в приоритете. Если на дату составления карты нет информации по какому-то району, то берётся информация за предыдущую дату и так далее. Все накопленные за 2-3-дневный период изображения подгружаются в ГИС в виде слоёв и далее интерпретируются ледовым экспертом.

2. Методика ледового картирования в ААНИИ.

Прежде чем приступить к описанию процесса создания ледовых карт, стоит отметить, что современная методика ледового картирования целиком и полностью построена на опыте предыдущих поколений ледовых наблюдателей. Как уже указывалась выше, все рекомендации по дешифрированию спутниковых изображений были составлены по результатам подспутниковых авиационных и наземных измерений. По сегодняшний день ААНИИ придерживается своей традиционной методики, которая основана на комплексном анализе всей доступной информации, поэтому изложенное

ниже описание во многом перекликается, например, с опубликованными ранее работами [25, 26]. Задача ледового эксперта – правильно интерпретировать изображения, полученные в различных диапазонах электромагнитного спектра, что требует большого опыта и, по возможности, участия в экспедиционных работах, которые позволяют улучшить навыки дешифрирования, сравнивая спутниковые изображения с реальными ледовыми условиями.

Зимний период (1 октября – 31 мая для арктических морей).

Составление карты в зимний период начинается с определения границ основных ледовых зон - старого льда, однолетнего льда, молодого льда, ниласа (включая начальные виды льда), а также положения кромки дрейфующих льдов и границ припая. Для обрисовки этих границ в основном используются радиолокационные изображения. Граница массива старого льда в приполюсном районе Арктики выделяется за счёт высоких значений удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) и, как следствие, яркого тона этих льдов среди более тёмных однолетних. Хорошо видны также и зоны с включением старых льдов, то есть районы, где старый лёд присутствует в количестве не более 4-5 баллов по 10-балльной шкале сплочённости. Положение кромки дрейфующего льда удобно определять по радиолокационным данным, поскольку облачность на оптических снимках затрудняет наблюдение за её динамикой. При наличии более актуальной информации в оптическом диапазоне, положение кромки может быть скорректировано. Если в течение трёх суток район или его часть были закрыты облачностью и радарная съёмка района не велась, для определения положения кромки могут быть использованы данные пассивной радиометрии, особенно осенью в период активного ледообразования на чистой воде. В этот период лёд формируется очень быстро и на больших площадях.

Для других целей микроволновые данные используются мало, исходя из того, что они могут показывать ошибки, которые существенны для целей ледового картирования [27-32]. Граница припая может быть легко восстановлена по радиолокационным снимкам, снимкам видимого и ИК диапазонов, особенно в случае отжимных ветров (дующих со стороны суши), формирующих в море за припаем обширную полынью. Если дрейфующий лёд плотно прижат к границе припая и полыньи нет, то припай определяется по двум или нескольким последовательным изображениям, чаще радиолокационным, полученным по одному району за разные даты, и если подвижек льда не наблюдается, то, скорее всего, в исследуемом районе установился припай. Аналогичным образом идентифицируются и такие формы неподвижного льда, как стамухи. Косвенные признаки, позволяющие распознать стамухи на спутниковых изображениях подробно изложены в работе Платоновой Е.В и Бычковой И.А., 2018 [33]. Зоны начальных видов льда и ниласа хорошо распознаются на радиолокационных изображениях по тёмному, почти чёрному тону.

Дальнейшее более подробное разделение ледяного покрова на однородные зоны лучше производить по данным видимого и ИК диапазонов. На отображение льда в данном случае влияют такие характеристики ледяного покрова, как альбедо (в видимом и ближнем ИК диапазонах) и температура поверхности (в тепловом ИК диапазоне), которые, в свою очередь, зависят от толщины льда. На радиолокационных снимках такой однозначной зависимости нет, и выделение различных типов однолетнего и молодого льда сильно усложняется. Следует отметить, что в течение зимних месяцев в Арктике длится полярная ночь, что исключает использование данных в видимом диапазоне электромагнитного спектра с середины октября по начало февраля.

Однородные зоны отделяются друг от друга, если имеют различную общую сплочённость и/или возрастной

состав льда. Сплочённость определяется визуально по 10-балльной шкале, где 1 балл соответствует 10% площади морской поверхности. Общая сплочённость показывает долю поверхности моря, занятую льдом, а возрастной состав указывает на количественное соотношение разных типов льда (не более трёх), сформировавшихся внутри каждой ледовой зоны. Сумма частных сплочённостей всегда равна общей сплочённости. Возрастной состав льда, а также размер встречающихся ледяных образований указывается в символе, который соответствует выделенной однородной зоне. Цветовые обозначения на «зимних» картах указывают на типы льда, которые преобладают в пределах выделенных зон. Эти цвета регламентированными ледовой Номенклатурой [10]. Следует заметить, что зона с преобладанием того или иного типа льда может иметь включения как более толстых льдов, так и льдов меньшей толщины.

Летний период
(1 июня – 30 сентября
для арктических морей).

В летний сезон в ледяном покрове выделяются только зоны с разной общей сплочённостью льда без указания его возрастного состава, поскольку появление слоя талой воды на поверхности льда существенно изменяет его отображение на всех видах спутниковых изображений, и различия между типами льда становятся не видны. Для определения общей сплочённости льда в летний сезон наиболее информативными являются радиолокационные изображения, а также изображения в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Данные тепловой ИК съёмки в этот период становятся неинформативными. Сплочённость, как и в зимний сезон, определяется визуально по 10-балльной шкале. Цветовое обозначение различных сплочённостей на «летних» картах также регламентировано Номенклатурой морских льдов. На Рисунке 5 показан пример современных ледовых карт, подготовленных в ААНИИ для Восточно-Сибирского моря в разные сезоны года.

3. Вспомогательная информация.

При составлении ледовой карты эксперт анализирует спутниковую информацию совместно с другими вспомогательными данными. Прежде чем приступить к выделению ледовых зон, оценивается величина и направление дрейфа за предшествующий период, чтобы отследить перемещение зон, выделенных ранее. Это необходимо, так как текущая ледовая карта должна быть согласована с предыдущей, поскольку кардинальных изменений ледовых условий за неделю, как правило, не происходит, за исключением особо динамичных районов. Для оперативного мониторинга дрейфа льда в ААНИИ используется алгоритм, реализованный аналогично алгоритму, описанному в работе Girard-Ardhuin F. и Ezraty R., 2012 [34]. Величина и направление дрейфа автоматически рассчитывается путем корреляционного анализа последовательных спутниковых изображений, синтезированных по микроволновым данным. Временной интервал между изображениями составляет одну неделю. Основным преимуществом использования таких данных является возможность всепогодного зондирования, независимо от освещенности поверхности, что особенно актуально в условиях высоких широт. По мере формирования суточной мозаики изображений на основе данных радиометра AMSR2 производится расчет полей дрейфа льда для всего Арктического бассейна. В дальнейшем полученные поля дрейфа в векторном формате используются для анализа смещения кромки, однородных ледовых зон или полей льда. Также эта информация используется для анализа режимных закономерностей динамики льда в рамках месяца или сезона.

Важным источником информации о состоянии ледяного покрова являются наблюдения, выполняемые на сети морских гидрометеорологических станций Росгидромета и передаваемые

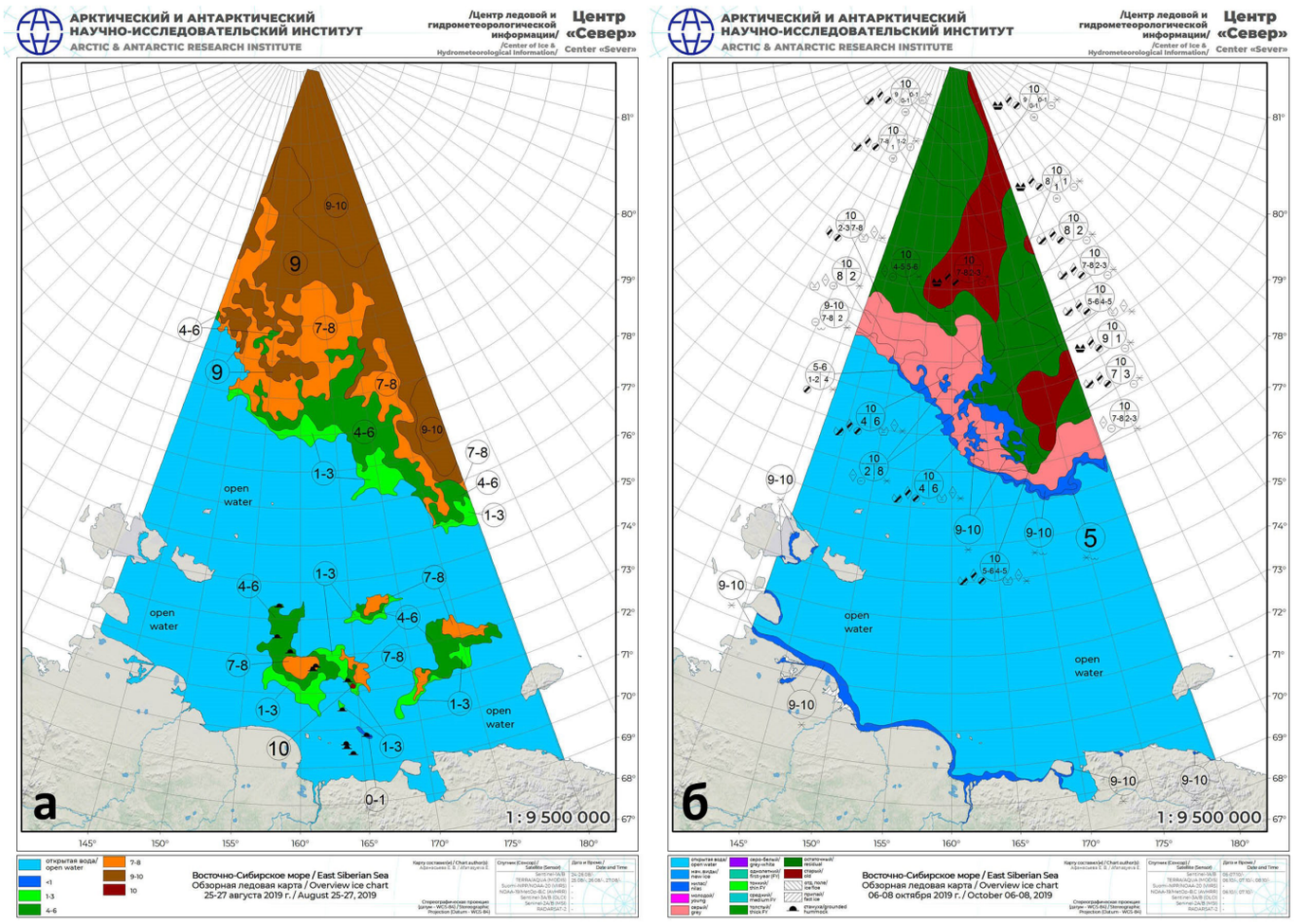

Рисунок 5 – Примеры обзорных ледовых карт ААНИИ, составленных по району Восточно-Сибирского моря 25-27 августа 2019 г. (а) и 6-8 октября 2019 г. (б).

местными управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) в Мировую базу данных. Комплекс метеорологических и ледовых наблюдений включает в себя температуру воздуха и воды, дальность видимости в сторону моря, сплочённость и тип дрейфующего льда, ширину и толщину припая, высоту снега. Данные о толщине припая используются ледовыми экспертами в качестве реперных: на спутниковых изображениях тон льда в удаленных от берега районах сопоставляется с тоном припая, толщина которого известна. Также, отслеживая фактическое изменение толщины льда на станции, можно судить о скорости нарастания льда в удалённых районах.

На Рисунке 6 показана карта распределения действующих в настоящее время (2019 г.) морских береговых станций, данные которых используются для анализа. В связи с невозможностью проведения регулярных гидрометеорологических измерений в удалённых от берега районах, для оценки скорости нарастания льда в мористых частях используются данные глобальной модели Global Forecast System (GFS) [35], а также данные реанализа Национального центра прогнозов окружающей среды (NCEP) и Национального центра атмосферных исследований (NCAR) США из открытых источников [36]. Экспертом оценивается общий температурный фон исследуемого района и приблизительная скорость нарастания льда.

Часть судов ледового класса, работающих в Российских территориальных водах, ежедневно высылают диспетчерские сообщения на адрес центра «Север» ААНИИ. Помимо общепринятой навигационной информации (название судна, координаты, дата и др.), судоводители включают в диспетчерские сообщения наблюдаемые ими ледовые и метеорологические условия на момент составления сообщения.

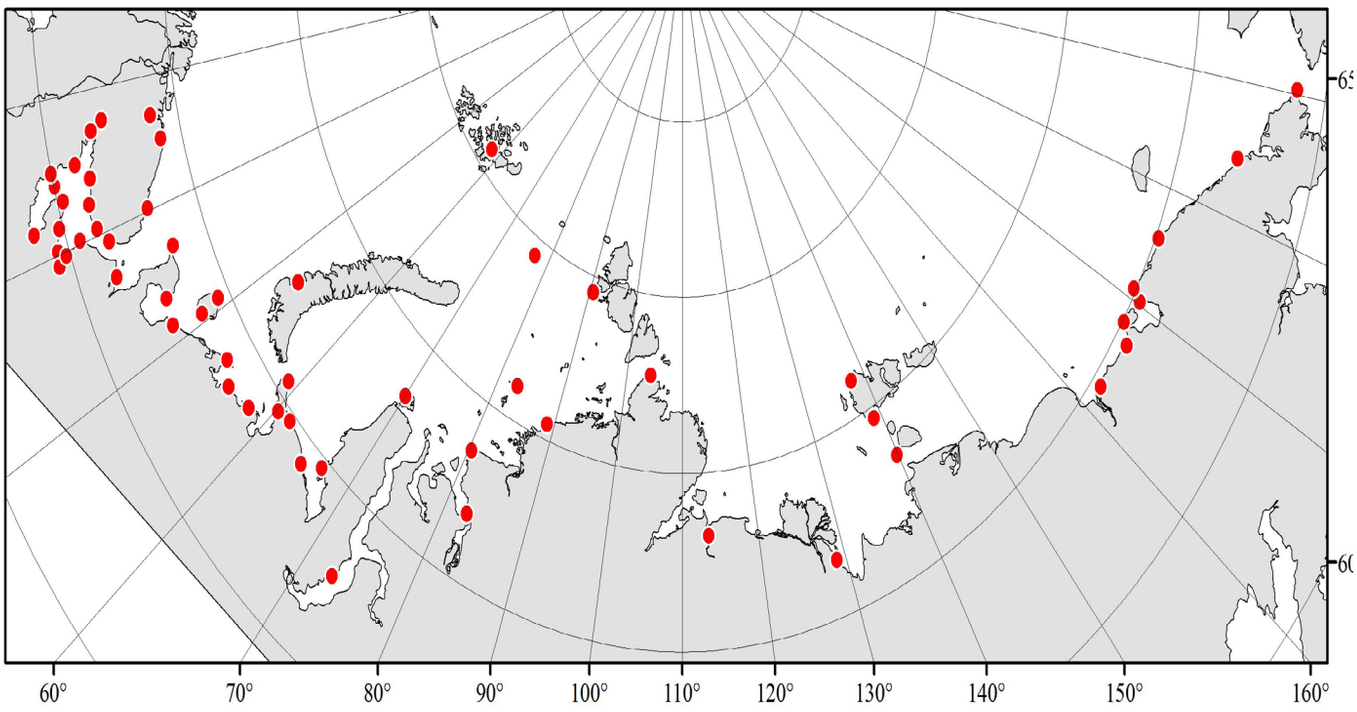

Рисунок 6 – Распределение сети морских береговых станций Росгидромета, расположенных в Арктике по состоянию на 2019 г.

В то же время с судов, на которых проходят научно-исследовательские экспедиции, организованные с участием сотрудников ААНИИ, поступает детализированная оперативная информация о ледовых и гидрометеорологических условиях плавания. Такие данные представляют ценный источник информации о текущем состоянии ледяного покрова и используются ледовым экспертом для валидации ледовых карт.

4. Принципы регионального картирования и распределение работы ледовых экспертов.

ААНИИ еженедельно выпускает ледовые карты следующих морей СЛО: Гренландского, Баренцева (включая Белое), Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, и Бофорта (включая море Линкольна). Также еженедельно составляются карты Берингова, Охотского (включая Татарский пролив Японского моря), Балтийского, Каспийского и Азовского морей. Границы арктических морей продлены до полюса таким образом, что весь СЛО оказывается поделённым на секторы, и общая карта покрывает не только акваторию моря в пределах его географических границ, но и соответствующий морю район центральной Арктики. Мониторинг каждого моря ведёт один или два ледовых эксперта, имеющих базовые знания о гидрологическом и метеорологическом режиме района, и, предпочтительно (но не во всех случаях), опыт полевых работ в данном районе. В течение зимнего сезона эксперт не меняется, что позволяет ему отследить развитие ледовой обстановки с момента ледообразования и составлять каждую новую карту, основываясь на предыстории. При необходимости смена эксперта может быть произведена в летние месяцы, но по возможности каждый эксперт занимается одной акваторией несколько лет, чтобы отследить основные закономерности внутригодовой изменчивости ледовых условий в данном районе. Для составления общей ледовой карты СЛО, секторы всех морей сводятся вместе, для чего границы ледовых зон на стыке соседних секторов должны быть согласованы между экспертами. Для унификации ледовых карт по всем районам, перед выпуском карта каждого моря проходит тщательную проверку главным и наиболее опытным ледовым экспертом центра «Север» ААНИИ. После того как общая карта СЛО готова, производится её

генерализация до шести основных зон в зимнее время: чистая вода, нилас (включая начальные виды льда), молодой лёд, однолетний лёд, старый лёд и припай; и до четырёх зон в летнее время: чистая вода, лёд сплочённостью 1-6 баллов (разреженный лёд), лёд сплочённостью 7-10 баллов (сплочённый лёд) и припай. Пример генерализированной ледовой карты показан на Рисунке 7. Генерализированные карты СЛО еженедельно обновляются на официальном сайте ААНИИ, где также доступен архив карт за период с 1997 г.

Региональные ледовые карты, составленные по отдельным морям, доступны в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду [24] начиная с 1997 г. Карты, составленные в более ранний период, на данный момент находятся в процессе оцифровки.

Заключение.

Ледовые карты ААНИИ широко используются для различных научных и практических задач, однако опыт общения с пользователями показывает, что данная информация требует некоторых разъяснений. Само понятие «обзорная ледовая карта» подразумевает некое обобщение, генерализацию. Ледяной покров – очень подвижная среда, и величина суточного дрейфа может достигать 20 морских миль и более. Обзорная ледовая карта отражает лишь некое осреднённое, как правило, за 2-3 суток состояние ледяного покрова и, как уже указывалось ранее, состоит из отдельных частей, привязанных к разным датам. Поэтому при сравнении обзорных ледовых карт ААНИИ с результатами других методов и алгоритмов, основанных на интерпретации одного изображения, необходимо иметь

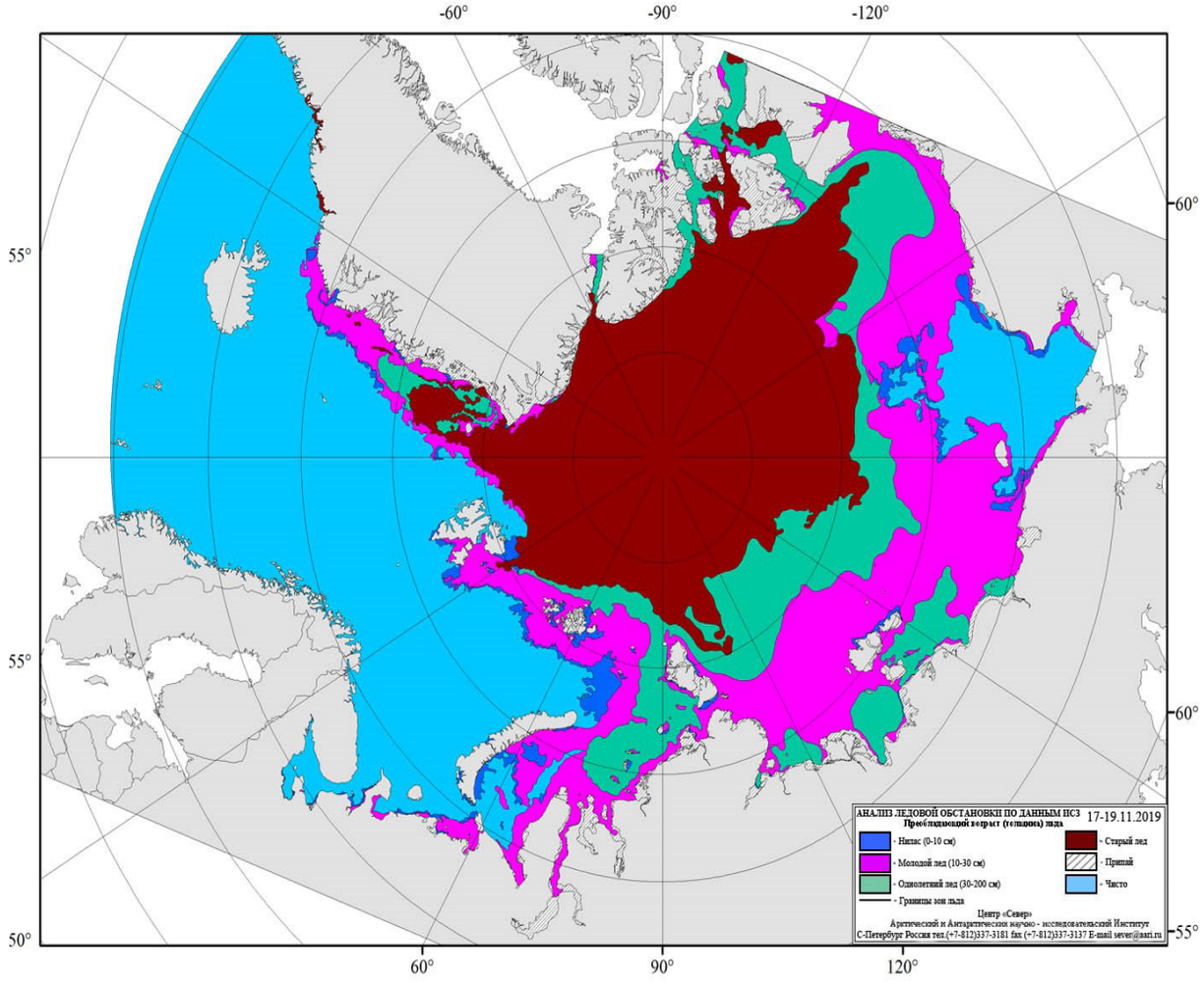

Рисунок 7 – Генерализированная ледовая карта СЛО за 17-19 ноября 2019 г. [37]

в виду, что границы зон могли быть проведены по более раннему или позднему снимку. По этой же причине, при использовании обзорных ледовых карт для судоходства, следует учитывать временной интервал, за который составлена карта. При непосредственном движении судна во льдах, после предварительной оценки ледовых условий в районе плавания по обзорной ледовой карте рекомендуется для уточнения использовать самые свежие спутниковые снимки, анализировать прогностическую метеорологическую и ледовую информацию, а также использовать срочные детализированные ледовые карты, отличающиеся более подробным описанием ледовой обстановки в конкретном районе в конкретный момент времени. Срочные детализированные карты составляются экспертами ААНИИ по одному спутниковому изображению, либо по нескольким изображениям, полученным в пределах 3-часового промежутка времени. Обзорные же ледовые карты рекомендуется использовать для предварительного планирования морских операций и общей оценки ледовой обстановки в районе движения судна. Также необходимо отметить, что цветовые обозначения на картах зимнего периода указывают только на тот тип льда, который преобладает в пределах выделенной зоны. Важная информация о количестве разводий, покрытых молодым льдом и ниласом, содержится в символе, который соответствует выделенной однородной зоне.

В заключение следует также добавить, что с конца 80-х-начала 90-х годов и по настоящее время учёные продолжают активно заниматься вопросом автоматического определения параметров ледяного покрова по спутниковым данным, полученным в различных диапазонах электромагнитного спектра. За несколько десятилетий было проведено и опубликовано огромное количество работ по данной тематике, в частности по автоматизации определения возраста (толщины) льда и его сплочённости. Обзор истории развития вопроса можно найти в монографии Sea Ice: Physics and..., 2015 [17]. Все исследователи приходят к общему мнению, что полностью автоматизировать процесс дешифрирования морского льда невозможно. У каждого метода всегда есть ряд условий, ограничивающих его применимость. Однако в настоящее время ледовые службы мира активно внедряют автоматические методы в свою работу с целью предварительного анализа спутниковой информации, которой в наши дни становится всё больше. Кроме того, каждый алгоритм разрабатывается под конкретные условия, чаще всего связанные с сезоном или географическим положением района, и грамотное применение алгоритма, безусловно, даёт ледовым аналитикам дополнительную полезную информацию, которая учитывается при составлении карт. На сегодняшний день анализ спутниковых данных в ААНИИ полностью проводится на интерактивной основе с применением ГИС; однако в будущем планируется внедрение автоматических технологий, которые станут хорошим инструментом, помогающим ускорить процесс обработки большого количества данных и снизить степень субъективности анализа. Разработанный АРМ «Эксперт ледовой карты», о котором говорилось ранее, позволит включить новые технологии непосредственно в процесс построения карты.

Благодарности.

При написании статьи были использованы неопубликованные личные воспоминания сотрудников Центра «Север»: Бушуева А.В., Быченкова Ю.Д. и Девятаева О.С. Авторы выражают благодарность также всем сотрудникам Центра, участвовавшим в развитии системы «Север», за внесённые предложения и поддержку данной работы, а также за передачу уникального опыта новому поколению.

Список литературы:

1. WMO №574, Sea-Ice Information Services in the World – Geneva, 2017.
2. http://ocean.dmi.dk/arctic/icecharts.uk.php – Архив ледовых карт Датского метеорологического института (DMI). – (дата обращения: 17.11.2019).
3. https://cryo.met.no/ – Архив ледовых карт Норвежского метеорологического института (MET.NO). – (дата обращения: 17.11.2019).
4. https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml – Архив ледовых карт Канадской ледовой службы (CIS). – (дата обращения: 17.11.2019).
5. https://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html – Архив ледовых карт Национального ледового центра США (NIC). – (дата обращения: 17.11.2019).
6. Моря советской Арктики. / Визе Ю. В. – М. Л.: Изд-во Главсевморпути, 1948. – 418 с.
7. Научные исследования в Арктике. / Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Ковалёв Е. Г., Смоляницкий В. М.; Под ред. Фролова И. Е., Карклина В. П. – СПб: Наука, 2007. – Т. 2: Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа– 135 с.
8. Исследование ледяного покрова с помощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО). / Бушуев А. В., Быченков Ю. Д., Лощилов В. С., Масанов А. Д. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 120 с.
9. Бушуев А. В., Гаврило В. П., Лебедев Г. А. Информативность различных видов и методов дистанционных ледовых наблюдений // Морской лёд / Под ред. Фролова И. Е., Гаврило В. П. – СПб: Гидрометеоиздат, 1997. – С. 345-369.
10. Номенклатура морских льдов, условные обозначения для ледовых карт. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
11. WMO №259, WMO Sea-Ice Nomenclature, – 2017.
12. Исследование распределения и динамики морских льдов по телевизионным снимкам ИСЗ "Метеор". / Бушуев А. В., Быченков Ю. Д. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 132 с.
13. Отчёт о научно-оперативном обеспечении зимнего плавания судов в западном районе Арктики в 1983-1984 гг. – Диксонское УГКС, о. Диксон, 1984.
14. JCOMM Technical Report №23, SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data, – 2014.
15. Bushuev A. V., Loshchilov V. S. Ice chart composition at AARI // in Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications. – Chichester: Springer Praxis, 2007. – p. 243-252.
16. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей. Под ред. Смирнова В. Г. – СПб: ААНИИ, 2011. – 240 с.
17. Sea Ice: Physics and Remote Sensing / Shokr M., Sinha N. K. – New Jersey: Wiley, 2015. – 624 p.
18. Соколова Ю. В. Центр приёма спутниковой информации ААНИИ на Шпицбергене // Российские полярные исследования. – 2019. – Т. 1, № 35. – С. 19-20.
19. https://worldview.earthdata.nasa.gov/ – Геопортал NASA Worldview. – (дата обращения: 02.12.2019).
20. https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome – Архив данных ДЗЗ NOAA. – (дата обращения: 02.12.2019).
21. https://www.polarview.aq/index.php/arctic – Геопортал Polar View. – (дата обращения: 02.12.2019).
22. http://www.seaice.dk/test.N/2019/ – Архив данных ДЗЗ Датского технического университета. – (дата обращения: 02.12.2019).
23. http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17 – Архив региональных ледовых карт на официальном сайте ААНИИ. – (дата обращения: 06.12.2019).
24. http://wdc.aari.ru/datasets/d0004 – Архив региональных ледовых карт ААНИИ // Мировой центр данных по морскому льду. – (дата обращения: 06.12.2019).
25. Бушуев А. В., Парамонов А. И. Общие принципы и методы дешифрирования и интерпретации данных // Морской лёд / Под ред. Фролова И. Е., Гаврило В. П. – СПб: Гидрометеоиздат, 1997. – С. 338-345.
26. Бушуев А. В. Комплексное использование информации // Морской лёд / Под ред. Фролова И. Е., Гаврило В. П. – СПб: Гидрометеоиздат, 1997. – С. 369-376.
27. Knuth M. A., Ackley S. F. Summer and early-fall Sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in Situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates // Annals of Glaciology. – 2006. – Vol. 44. – p. 303-309.
28. Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 21.
29. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2008. – Vol. 113, № C2.
30. Steffen K., Maslanik J. A. Comparison of Nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer radiance and derived sea ice concentrations with Landsat imagery for the north water area of Baffin Bay // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1988. – Vol. 93, № C9. – p. 10769-10781.
31. Steffen K., Schweiger A. NASA team algorithm for sea ice concentration retrieval from Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager: Comparison with Landsat satellite imagery // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1991. – Vol. 96, № C12. – p. 21971-21987.
32. Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Saldo R., Soerensen A. M. Satellite Passive Microwave Sea-Ice Concentration Data

Set Intercomparison: Closed Ice and Ship-Based Observations // The Cryosphere Discuss. – 2019. – Vol. 2019. – p. 1-55.
33. Платонова Е. В., Бычкова И. А. Многолетние наблюдения за стамухами Восточно-Сибирского моря с использованием спутниковых данных // Учёные записки РГГМУ. – 2018. – Т. 53. – С. 103-112.
34. Girard-Ardhuin F., Ezraty R. Enhanced Arctic Sea Ice Drift Estimation Merging Radiometer and Scatterometer Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 50, № 7. – p. 2639-2648.
35. https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs – Страница официального сайта NOAA NCEI с описанием глобальной модели GFS. – (дата обращения: 20.11.2019).
36. https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.nmc.reanalysis.html – Страница с описанием данных реанализа NCEP/NCAR. – (дата обращения: 20.11.2019).
37. http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=94 – Архив генерализированных ледовых карт Северного Ледовитого океана, составленных ААНИИ. – (дата обращения: 17.11.2019).

References:

1. WMO №574, Sea-Ice Information Services in the World – Geneva, 2017.
2. http://ocean.dmi.dk/arctic/icecharts.uk.php – Danish Meteorological Institute (DMI) ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).
3. https://cryo.met.no/ – Norwegian Meteorological Institute (MET.NO) ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).
4. https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/page1.xhtml – Canadian Ice Service (CIS) ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).
5. https://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html – The United States National Ice Center (NIC) ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).
6. Morya sovetskoj Arktiki. / Vize YU. V. – M. L.: Izd-vo Glavsevmorputi, 1948. – 418 p. (in Russian)
7. Nauchnye issledovaniya v Arktike. / Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Kovalyov E. G., Smolyanickij V. M.; Edited by Frolov I. E., Karklin V. P. – SPb: Nauka, 2007. – Vol. 2: Klimaticheskie izmeneniya ledyanogo pokrova morej Evrazijskogo shel'fa– 135 p. (in Russian)
8. Issledovanie ledyanogo pokrova s pomoshch'yu radiolokacionnyh stancij bokovogo obzora (RLS BO). / Bushuev A. V., Bychenkov YU. D., Loshchilov V. S., Masanov A. D. – L.: Gidrometeoizdat, 1983. – 120 p. (in Russian)
9. Bushuev A. V., Gavrilo V. P., Lebedev G. A. Informativnost' razlichnyh vidov i metodov distancionnyh ledovyh nablyudenij // Morskoj lyod / Edited by Frolov I. E., Gavrilo V. P. – SPb: Gidrometeoizdat, 1997. – P. 345-369. (in Russian)
10. Nomenklatura morskih l'dov, uslovnye oboznacheniya dlya ledovyh kart. – L.: Gidrometeoizdat, 1974. (in Russian)
11. WMO №259, WMO Sea-Ice Nomenclature, – 2017.
12. Issledovanie raspredeleniya i dinamiki morskih l'dov po televizionnym snimkam ISZ "Meteor". / Bushuev A. V., Bychenkov YU. D. – L.: Gidrometeoizdat, 1978. – 132 p. (in Russian)
13. Report on scientific and operational support for winter navigation in the western Arctic in 1983-1984. – Diksonskoe UGKS, Dikson Island, 1984. (in Russian)
14. JCOMM Technical Report №23, SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data, – 2014.
15. Bushuev A. V., Loshchilov V. S. Ice chart composition at AARI // in Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications. – Chichester: Springer Praxis, 2007. – p. 243-252.
16. Sputnikovye metody opredeleniya harakteristik ledyanogo pokrova morej. Edited by Smirnov V. G. – SPb: AANII, 2011. – 240 p. (in Russian)
17. Sea Ice: Physics and Remote Sensing / Shokr M., Sinha N. K. – New Jersey: Wiley, 2015. – 624 p.
18. 18. Sokolova YU. V. Centr priyoma sputnikovoj informacii AANII na SHpicbergene // Rossijskie polyarnye issledovaniya. – 2019. – Vol. 1, № 35. – P. 19-20. (in Russian)
19. https://worldview.earthdata.nasa.gov/ – NASA Worldview application, part of the NASA Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS). – (accessed 02.12.2019).
20. https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome – NOAA Comprehensive Large Array-Data Stewardship System (CLASS). – (accessed 02.12.2019).
21. https://www.polarview.aq/index.php/arctic – Polar View sea ice products database. – (accessed 02.12.2019).
22. http://www.seaice.dk/test.N/2019/ – Technical University of Denmark (DTU) sea ice products database. – (дата обращения: 02.12.2019).
23. http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=17 – AARI regional ice charts archive available through the AARI official web-site. – (accessed 17.11.2019).
24. http://wdc.aari.ru/datasets/d0004 – AARI regional ice charts archive // The World Data Center for Sea Ice. – (accessed 06.12.2019).
25. Bushuev A. V., Paramonov A. I. Obshchie principy i metody deshifrirovaniya i interpretacii dannyh // Morskoj lyod / Edited by Frolov I. E., Gavrilo V. P. – SPb: Gidrometeoizdat, 1997. – P. 338-345. (in Russian)
26. Bushuev A. V. Kompleksnoe ispol'zovanie informacii // Morskoj lyod / Edited by Frolov I. E., Gavrilo V. P. – SPb: Gidrometeoizdat, 1997. – P. 369-376. (in Russian)

27. Knuth M. A., Ackley S. F. Summer and early-fall Sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in Situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates // Annals of Glaciology. – 2006. – Vol. 44. – p. 303-309.
28. Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 21.
29. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2008. – Vol. 113, № C2.
30. Steffen K., Maslanik J. A. Comparison of Nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer radiance and derived sea ice concentrations with Landsat imagery for the north water area of Baffin Bay // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1988. – Vol. 93, № C9. – p. 10769-10781.
31. Steffen K., Schweiger A. NASA team algorithm for sea ice concentration retrieval from Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager: Comparison with Landsat satellite imagery // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1991. – Vol. 96, № C12. – p. 21971-21987.
32. Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Saldo R., Soerensen A. M. Satellite Passive Microwave Sea-Ice Concentration Data Set Intercomparison: Closed Ice and Ship-Based Observations // The Cryosphere Discuss. – 2019. – Vol. 2019. – p. 1-55.
33. Platonova E. V., Bychkova I. A. Mnogoletnie nablyudeniya za stamuhami Vostochno-Sibirskogo morya s ispol'zovaniem sputnikovyh dannyh // Uchyonye zapiski RGGMU. – 2018. – Vol. 53. – P. 103-112.
34. Girard-Ardhuin F., Ezraty R. Enhanced Arctic Sea Ice Drift Estimation Merging Radiometer and Scatterometer Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 50, № 7. – p. 2639-2648.
35. https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs – NOAA NCEI web-page with the Global Forecast System (GFS) model description. – (accessed 20.11.2019).
36. https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.nmc.reanalysis.html – Web-page with the NCEP/NCAR reanalysis data description. – (accessed 20.11.2019).
37. http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=94 – AARI Arctic Ocean ice charts archive. – (accessed 17.11.2019).