

Шумилов И.В.¹, Минервин И.Г.², Пищальник В.М.³, Терентьев Н.С.⁴

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КРОМОК ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

АННОТАЦИЯ

В работе представлено описание разработанного нового модуля к программному комплексу «ЛЁД» для вычисления на произвольную дату кромок ледяного покрова. Расчет географического положения кромок и средней кромки льда между двумя ранее построенными кромками осуществляется на основе карт-схем ледяного покрова, составляемых по спутниковым данным. В модуле реализован алгоритм, позволяющий идентифицировать кромку как набор последовательных точек, выявленных на границе между полем ледяного покрова и чистой водой. При этом для каждой точки искомой кромки определены как географические, так и декартовы координаты. Алгоритм вычисления географического местоположения кромок льда заключается в последовательном переборе всех горизонтальных и вертикальных смежных пар пикселей карты-схемы и в определении по их цветовой характеристике наличия перехода цвета с вычислением координат пограничной точки между двумя цветоразностными пикселями. Обнаружение первой точки участка кромки позволяет перейти к циклическому поиску смежных точек, подходящих под условие наличия кромки, и составлению полного списка точек данного участка. Аналогично происходит поиск всех остальных участков в пределах акватории, изображенной на карте-схеме. Вычисление географического местоположения средней кромки осуществляется методом последовательного поиска для каждой точки одной кромки соответствующей ближайшей точки другой кромки и последующим расчетом для найденных пар средней точки. Ее координаты определяются как среднее арифметическое между долготами и широтами пары ближайших точек кромок. Средняя кромка также может вычисляться рекурсивно на основе других ранее построенных средних кромок. Программный модуль позволяет производить анализ карт на наличие кромок, корректировать отдельные участки кромок перед этапом вычисления и получать результирующие текстовые файлы с упорядоченными наборами географических координат точек кромки льда. Выходные данные совместимы с ГИС, что дает возможность их дальнейшей обработки и визуализации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кромка льда, ледовые карты-схемы, ледяной покров, замерзающие моря, дистанционное зондирование Земли.

¹ Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, e-mail: ilyarolevik1@yandex.ru

² Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, e-mail: igor@minervin.ru

³ Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, e-mail: vpishchalnik@rambler.ru

⁴ Сахалинский государственный университет, ул. Ленина, д. 290, 693000, Южно-Сахалинск, Россия, e-mail: terentievns@yandex.ru

Ilya V. Shumilov¹, Igor G. Minervin², Vladimir M. Pishchal'nik³, Nikolay S. Terentyev⁴

DEVELOPMENT OF THE PROGRAM MODULE FOR CALCULATION OF ICE EDGES BY THE EARTH REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

The paper describes the developed new module for the "ICE" software package for calculating the edges of the ice cover at an arbitrary date. The geographic location of the edges and the middle edge of the ice between the two previously constructed edges is calculated on the basis of ice map-charts, compiled from satellite data. The algorithm is implemented in the module allows identifying the edge as a set of consecutive points identified on the boundary between the ice cover field and clean water. For each point of the calculating edge, both geographical and Cartesian coordinates are defined. The algorithm for calculating the geographic location of the edges of ice includes the sequential search of all horizontal and vertical adjacent pairs of pixels of the map-chart and determining the presence of a color transition by their color characteristics with the calculation of the coordinates of the boundary point between two color difference pixels. Detection of the first point of the edge sector allows us to proceed to a cyclical search for adjacent points that are suitable for the edge condition and to compile a complete list of points of this sector. Similarly, all other sectors are searched all over the water area on the map. The calculation of the geographic location of the middle edge is performed by the method of sequential search for each point of one edge the corresponding nearest point of the other edge and the following calculation the midpoint for the found pairs. Its coordinates are defined as the arithmetic mean between the longitudes and latitudes of the pair of nearest edge points. The middle edge can also be calculated recursively based on other previously constructed middle edges. The software module allows to analyze maps for the existence of edges, to correct individual sectors of the edges before the calculation stage and to obtain the resulting text files with ordered sets of geographic coordinates of the ice edge points. The output data is compatible with GIS, which allows further processing and visualization.

KEYWORDS: ice edge, ice map-charts, ice cover, freezing seas, Earth remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют производить мониторинг ледяного покрова и получать данные для составления ледовых карт-схем, содержащих информацию о площадях, покрытых льдом различной сплоченности и других гидрометеорологических характеристиках [Плотников, 1998; Якунин и др., 1998; Митник и др., 2015]. Одной из задач мониторинга и анализа ледовых условий является определение местоположения кромок льда – границ между льдом и чистой водой [WMO, 1970], что имеет важное значение при обеспечении безопасности судоходства и морских работ и является актуальной задачей для замерзающих водоемов.

Разработанный в Сахалинском Государственном Университете программный комплекс «ЛЁД» (ПК «ЛЁД») предназначен для изучения ледового режима с использованием данных ДЗЗ для расчета площади и объема морского льда в различных пространственно-временных масштабах в районах с произвольными границами [Пищальник и др., 2015;

¹ Sakhalin State University, Lenin str., 290, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *e-mail*: ilyarolevik1@yandex.ru

² Sakhalin State University, Lenin str., 290, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *e-mail*: igor@minervin.ru

³ Sakhalin State University, Lenin str., 290, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *e-mail*: vpishchalnik@rambler.ru

⁴ Sakhalin State University, Lenin str., 290, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *e-mail*: terentievns@yandex.ru

Шумилов и др., 2017]. С целью дальнейшего расширения возможностей ПК «ЛЁД» был разработан дополнительный отдельный модуль для вычисления местоположения кромок льда в географических координатах на определённую дату с функцией вычисления средних кромок для произвольного временного периода.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (номер для публикаций: 5.9510.2017/8.9).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчет положения кромки производится на основе карт-схем ледяного покрова, в том числе, публикуемых в открытом доступе на официальном сайте Японского метеорологического агентства (JMA) [www.jma.go.jp] (рис. 1). Карты-схемы JMA составляются на основе спутниковых снимков с космических аппаратов NOAA и MTSAT с пространственным разрешением до 1 км в надире, публикуются в оперативном режиме в период с декабря по май два раза в неделю и представляют изображения формата GIF в универсальной полярной стереографической проекции (UPS) с разрешением 640 x 448 пикселей. После конца ледового сезона формируется и публикуется коллекция пентадных (раз в пять дней) архивных карт-схем с разрешением 512 × 512 пикселей. Ледяной покров на примере карты-схемы акватории Охотского и Японского морей представляется в цветовой гамме градаций сплоченности по шкале WMO [WMO, 1970] на фоне пространства чистой воды, выделенной синим цветом. Это позволяет однозначно идентифицировать кромку льда, как границу ледяного покрова и чистой воды, представленную как набор упорядоченных точек с географическими координатами.

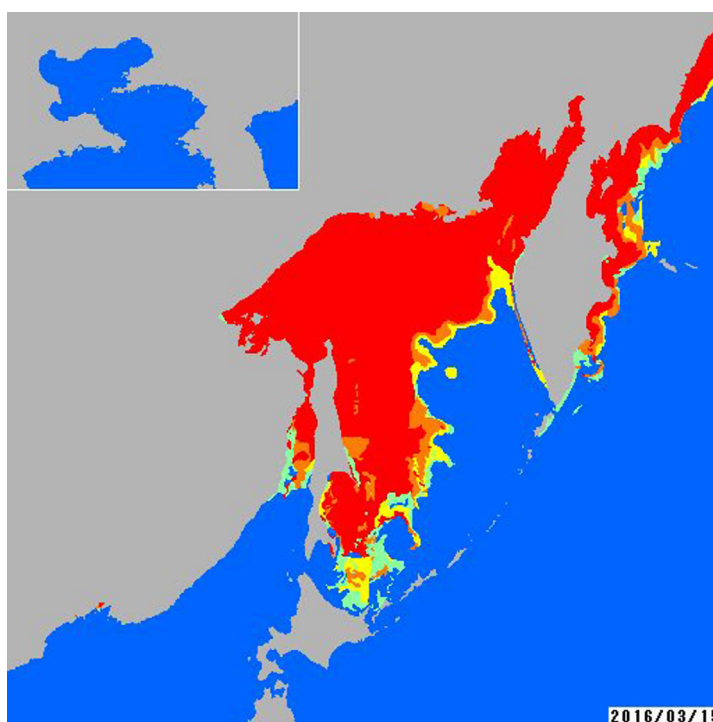


Рис. 1. Пример карты-схемы JMA на 15 марта 2016 г.
Fig. 1. An example of the JMA map-chart on March 15, 2016

Для разработки программного модуля вычисления кромки льда была использована интегрированная среда Visual Studio Community 2015. Модуль написан на объектно-ориентированном языке программирования C# с применением технологии Windows Forms.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для однозначного определения местоположения точек, образующих кромку льда, устанавливается соответствие между декартовыми координатами изображения и географическими координатами. Для карт-схем ЖМА это координаты в универсальной полярной стереографической проекции UPS [Вахрамеева и др., 1986]. Начальная точка декартовых координат устанавливается в левом верхнем углу карты-схемы.



Рис. 2. Принцип поиска точек кромки льда
Fig. 2. The principle of finding the points of the ice edge

Для идентификации точек кромки льда используется цветовая характеристика пикселей карты-схемы: в цикле производится поочередное сравнение цветов соседних пикселей карты по горизонтали и по вертикали (рис. 2). В процессе перебора выделяются пары пикселей, подходящие под условие наличия кромки – цвет одного из пикселей соответствует открытой водной поверхности, другого – морскому льду (любой сплоченности). Таким образом происходит вычисление начальных точек участков линии кромки. Точкой, принадлежащей линии кромки, принимается точка, лежащая на середине границы сравниваемых пикселей.

При обнаружении первой точки участка кромки происходит дальнейшее построение данного участка. Для этого в процедуре поиска точек производится поочередная проверка смежных точек, которые могут являться продолжением данного участка кромки (рис. 2, 3).

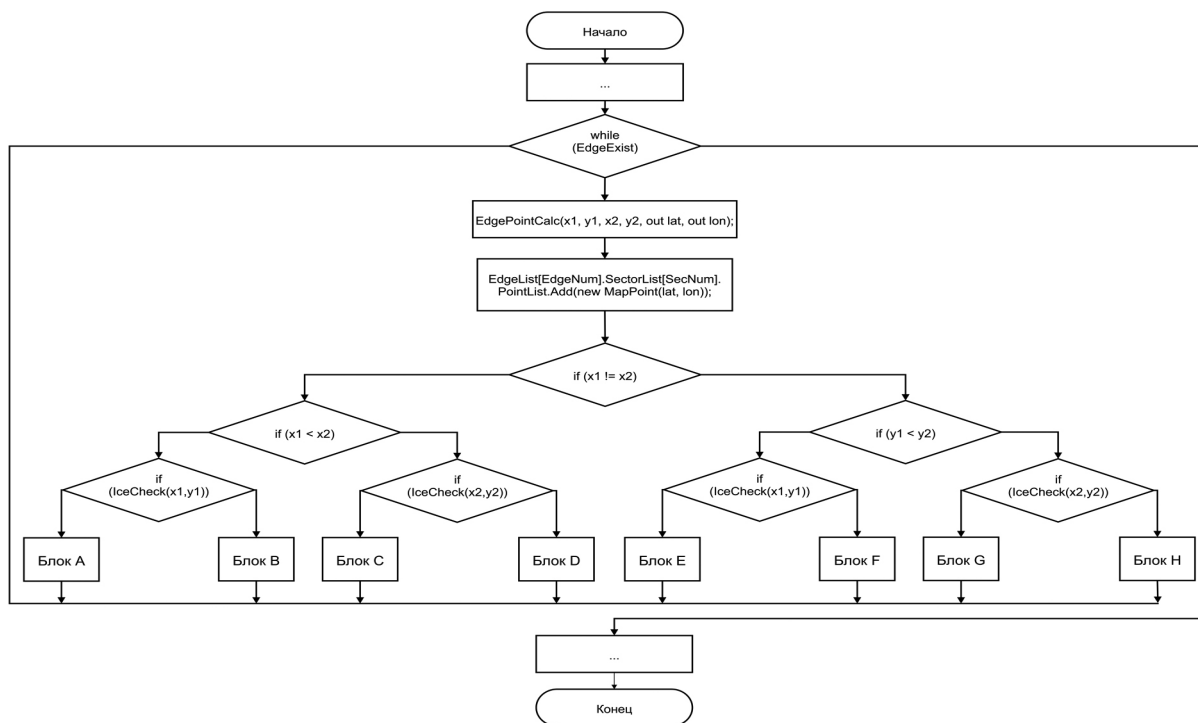


Рис. 3. Блок-схема фрагмента процедуры поиска точек участка кромки льда
Fig. 3. Block diagram of the part of the procedure for finding points of the ice edge sector

В блоках А-Н процедуры производится перебор смежных точек в соответствии с вариантом расположения пары пикселей – горизонтально (А, В, С, D) или вертикально (Е, F, G, H), области, покрытой льдом – слева (А, С), справа (В, D), сверху (Е, G) или снизу (F, H), а также области поиска кромки – вверх (А, В) или вниз (С, D), справа (Е, F) или слева (G, H) (см. рис. 2, 3). Обход смежных точек производится по или против часовой стрелки, в зависимости от перечисленных условий. Операции поиска производятся циклично до момента нахождения всех точек участка кромки. В ходе поиска их координаты переводятся из декартовых в географические и последовательно записываются в список точек участка кромки.

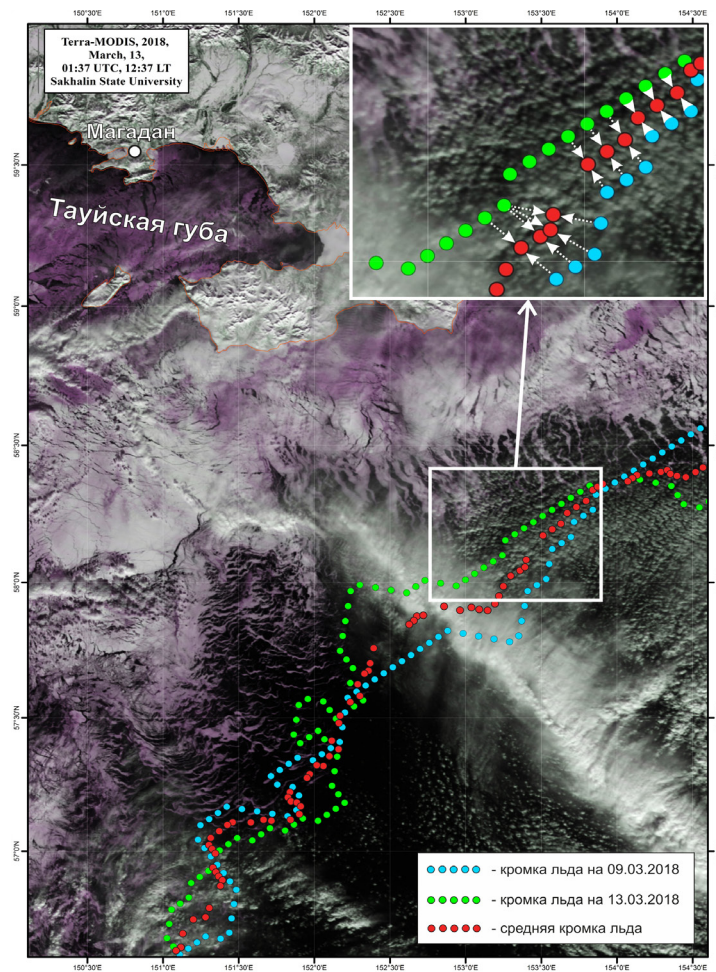


Рис. 4. Полученные в результате обработки в программном модуле ледовых карт-схем кромки льда, наложенные на спутниковый снимок Terra-MODIS
 Fig. 4. The ice edges resulting from processing ice map-charts in program module and placed on the Terra-MODIS satellite image

Все обнаруженные точки кромки исключаются из дальнейшей проверки во избежание лишних расчетов. Аналогично производится поиск других участков на всей исследуемой акватории. Результатом обработки изображения является список участков кромки льда, представленных упорядоченными наборами точек с географическими координатами (рис. 4).

Расчет средней кромки льда между различными датами может осуществляться для любых отдельных участков всей кромки путем выбора по запросу. Вычисление средней кромки между различными датами производится методом последовательного перебора: для каждой точки одной кромки находится ближайшая к ней точка, принадлежащая дру-

гой кромке (см. рис. 4). Расстояние между точками определяется в градусной мере по модифицированной формуле сферической тригонометрии (1) [Гараевская, Малюсова, 1976].

$$S = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \varphi_2 \sin \Delta\lambda)^2 + (\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta\lambda)^2}}{\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta\lambda} \right\} \quad (1)$$

где φ_1, φ_2 – широты обеих точек в радианах, $\Delta\lambda$ – разница долготы обеих точек в радианах.

При обнаружении ближайшей точки производится расчёт географических координат средней точки между рассматриваемой точкой первой кромки и ближайшей к ней точкой второй кромки путём вычисления среднего арифметического между соответствующими координатами широты и долготы двух рассматриваемых точек по формулам (2) и (3).

$$\varphi_{cp} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}, \quad (2)$$

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}, \quad (3)$$

где φ_{cp} и λ_{cp} – соответственно, широта и долгота средней точки.

Вследствие особенностей географической системы координат возникает искажение расстояния с севера на юг, в результате чего образуется ошибка вычисления средней кромки и не превышает 1 % от расстояния между рассматриваемыми ближайшими точками кромок. В результате вычислений составляется набор упорядоченных точек средней кромки с географическими координатами (см. рис. 4). Средняя кромка может вычисляться как на основе фактических данных, полученных при обработке ледовых карт-схем, так и рекурсивно между другими, ранее рассчитанными средними кромками.

В результате обработки ледовых карт-схем координаты точек кромок льда импортируются из модуля ПК «ЛІЕД» в текстовый файл (.txt). Первая строка включает заголовки столбцов, а последующие содержат информацию о каждой точке кромки: порядковый номер точки; координаты широты и долготы; число, указывающее на порядковый номер участка кромки, к которому относится данная точка. Столбцы отделяются друг от друга разделителями-табуляциями. Сформированная таблица совместима с программными продуктами ГИС для дальнейшей обработки.

ВЫВОДЫ

1. Впервые был разработан электронный инструмент для расчета кромок ледяного покрова замерзающих морей по данным ДЗЗ, который может использоваться для оперативного мониторинга и режимных исследований ледяного покрова.

2. Результирующие файлы с данными о положении кромки легко импортируются в ГИС для визуализации, дальнейшей обработки и анализа.

На основе разработанной методики планируется создание электронного атласа кромок Охотского и Японского морей в современный период глобального потепления. Методика построения кромки льда может быть использована при построении моделей ледовых прогнозов с учетом других метеорологических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вахрамеева Л.А., Бугаевский Л.М., Казакова З.Л. Математическая картография: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 286 с.
2. Гараевская Л.С., Малюсова Н.В. Практическое пособие по картографии. М.: Недра, 1976. 302 с.

3. Митник Л.М., Трусенкова О.О., Лобанов В.Б. Дистанционное радиофизическое зондирование океана и атмосферы из космоса: достижения и перспективы (обзор) // Вестник ДВО РАН. 2015. № 6. С. 21–22.
4. Пищальник В.М., Бобков А.О., Минервин И.Г., Романюк В.А. Основные принципы работы программного комплекса «Лёд» // Физика геосфер: Девятый Всерос. симп., 31 августа – 4 сентября 2015 г., г. Владивосток, Россия: материалы докл. / Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 556–561.
5. Плотников В.В. Ледовые условия и методы их прогнозирования / В.В. Плотников, Л.П. Якунин, В.А. Петров // Проект «Моря». Гидрология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 291–340.
6. Шумилов И.В., Пищальник В.М., Минервин И.Г. О новой версии программного комплекса «ЛЁД» // ИнтерКарто/ИнтерГИС 23. Материалы Междунар. конф. М.: Изд-во Московского университета, 2017. Т. 2. С. 250–256. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-250-256.
7. Якунин Л.П., Плотников В.В., Петров А.Г. Ледовые условия // Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VIII. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 347–394.
8. WMO Sea-Ice Nomenclature. Geneva, 1970. WMO # 259. TP. 145. P. 1. E-3–E-8.

REFERENCES

1. Garaevskaya L.S., Malyusova N.V. Practical guide to cartography. M.: Nedra, 1976. 302 p. (in Russian).
2. Mitnik L.M., Trusenkova O.O., Lobanov V.B. Remote radiophysical sensing of the ocean and atmosphere from space: achievements and prospects (overview). Vestnik DVO RAN. 2015. No 6. P. 21–22 (in Russian).
3. Plotnikov V.V. Ice conditions and methods for predicting them. V.V. Plotnikov, L.P. Yakunin, V.A. Petrov. Project "The Seas". Hydrology and hydrochemistry of the seas. V. IX. Sea of Okhotsk. Issue 1. Hydrometeorological conditions. SPb.: Gidrometeoizdat, 1998. P. 291–340 (in Russian).
4. Shumilov I.V., Pishchalnik V.M., Minervin I.G. About the new version of the software complex "Ice". InterKarto/InterGIS 23. Materialy Mezhdunar. Konf. M.: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2017. V. 2. P. 250–256. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-250-256 (in Russian).
5. Vahrameeva L.A., Bugaevskij L.M., Kazakova Z.L. Mathematical Cartography: textbook for Universities. M.: Nedra, 1986. 286 p. (in Russian).
6. WMO Sea-Ice Nomenclature. Geneva, 1970. WMO # 259. TP. 145. P. 1. E-3–E-8 (in Russian).
7. Yakunin L.P., Plotnikov V.V., Petrov A.G. Ledovye usloviya. Project "The Seas". Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. V. VIII. Japanese Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions. SPb.: Gidrometeoizdat, 1998. P. 347–394.