

Технология мониторинга и анализа гидрометеорологической обстановки в Арктике¹

В.Г. Гитис*, А.Б. Дерендяев*, К.Н. Петров*, А.П. Вайншток*, И.О. Думанская***, С.Н. Зацева**, А.А. Зеленко***, А.А. Ивченко**, Е.С. Нестеров***

* Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия

** Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова (Росгидромет), Москва, Россия

*** Гидрометцентр России (Росгидромет), Москва, Россия

Поступила в редколлегию 20.11.2017

Аннотация—Рассматривается новая геоинформационная технология мониторинга гидрометеорологической обстановки в Арктике. Технология объединяет два уровня анализа геоданных: первый уровень поддерживает автоматическую загрузку и обработку данных, предоставляя оператору простые инструменты анализа с интуитивно понятным интерфейсом и наглядным представлением результатов, доступным для широкого класса пользователей; второй уровень предназначен для детального анализа гипотез, которые специалист может сформулировать на первом уровне. Платформа мониторинга имеет два программных приложения: (1) климатические процессы Арктики и (2) оперативная и прогнозная обстановка регионов Белого и Баренцева морей с возможностью анализа экологической угрозы уязвимым ресурсам при добыче и транспортировке углеводородов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технология мониторинга, анализ природных и антропогенных процессов, Арктика, ГИС, разлив углеводородов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Природные и антропогенные процессы в Арктике в значительной степени влияют на состояние природной среды Земли [1, 2]. Особую роль в этом играет высокая чувствительность Арктического региона к увеличению средней температуры. Потепление в Арктических широтах приводит к сокращению ледяного покрова, что уменьшает отражение солнечных лучей и тем самым способствует перегреву Земли. Появление при таянии льда больших масс холодной пресной воды уменьшает соленость приарктических вод, что вызывает изменение океанических течений. Уменьшение толщи ледяного покрова и таяние вечной мерзлоты приводит к нарушению динамического равновесия, в котором находятся отложения придонных и подземных газовых гидратов. В результате в атмосферу Земли высвобождаются большие объемы метана, что способствует глобальному потеплению [3].

Арктика чрезвычайно богата углеводородными, минеральными и биологическими ресурсами. Это стимулирует интенсивное развитие хозяйственной деятельности по их освоению. Углеводороды добываются на Арктическом шельфе, в прибрежных зонах разрабатываются месторождения редкоземельных минералов, морская среда широко используется в рыбохозяйственной деятельности и для развития транзитного потенциала. Хозяйственная деятельность,

¹ Работа выполнена в Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской Академии наук, Государственном океанографическом институте им. Н.Н.Зубова и Гидрометцентре России. Разделы 2, 3.1, 3.2 и 3.5 выполнены за счет гранта Российского Научного фонда, проект №14-50-00150, Разделы 1, 3.3, 3.4 и 3.6 выполнены за счет грантов Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проекты 16-07-00326 и 17-07-00494.

способы хранения промышленных отходов (в том числе и радиоактивных), а также различные аварийные ситуации могут оказывать существенное влияние на экологию Арктики. Очевидно, что в дальнейшем антропогенное воздействие на природные процессы в Арктике будет только увеличиваться. При этом известно, что особенностью природы Арктики является очень медленное восстановление после негативного антропогенного воздействия [4]. Рассмотренные факторы определяют причины, по которым Арктический регион в настоящее время является одним из важнейших объектов мониторинга природных и антропогенных процессов.

Для мониторинга и анализа гидрометеорологических процессов в России разработана Единая Система Информации об обстановке в Мировом Океане (ЕСИМО) [5], <http://portal.esimo.ru/portal/>). Это большая система, которая поддерживает около 200 баз данных, содержит свыше 2300 разнородных информационных ресурсов общим объемом более 5 Тб. Аналитические ресурсы ЕСИМО включают в себя более 100 вычислительных систем, расположенных на серверах различных организаций. Для анализа пространственно-временных данных ЕСИМО разработана сетевая Географическая Информационная Система (ГИС) ГеоЕСИМО [6], которая подключена к portalу ЕСИМО как настраиваемый портлет. ГеоЕСИМО разработана на базе ГИС GeoТайм 3 [7]. Для интеграции с ЕСИМО в неё введен ряд дополнительных функций, таких, как: регламентированный доступ к распределенным информационным и вычислительным ресурсам, сохранение результатов анализа для их повторного использования или для передачи другому пользователю, автоматическая регистрация взаимодействия ГИС с компонентами системы ЕСИМО (сообщения о сбоях, отслеживание хода выполнения внешних задач, ведение журнала ГИС-операций), подключение ГИС-приложений к portalу, создание и редактирование пользователем проблемно-ориентированного ГИС-проекта и др.

Использование ГИС ГеоЕСИМО в практических задачах ЕСИМО показало, что ее универсальность оказалась слишком сложной для ряда пользователей, для которых предпочтительнее выделение конкретных задач в отдельные приложения. В данной работе мы рассматриваем основы альтернативной технологии применения ГИС к мониторингу окружающей среды. Подход объединяет два уровня исследования данных: автоматический и упрощенный анализ данных, доступный обычному пользователю сети Интернет, и детальный анализ, выполняемый специалистом. Он был апробирован в 2014 г. применительно к мониторингу и анализу динамики сейсмических полей [8]. В статье показано обобщение идеи построения двухуровневой системы мониторинга на другую предметную область. Описание программной реализации технологии анализа гидрометеорологических, ледовых и техногенных процессов в Арктике снабжено рядом примеров, которые показывают некоторые из аналитических возможностей системы.

2. КОНЦЕПЦИЯ

Мониторинг природных и антропогенных процессов применяется для регулярного наблюдения, оценивания и прогноза состояния окружающей среды. Решение этих задач основано на методах анализа больших объемов разнотипных пространственных и пространственно-временных данных. Особенности таких данных требуют применения специализированных методов и технологий, которые реализуются в сетевых ГИС.

Запрашиваемые сведения о состоянии и изменении окружающей среды можно разделить на две группы. К первой группе относятся сведения, которые являются результатами заранее заданных методов анализа определенного набора данных. Ко второй группе относятся сведения, для получения которых требуется применение методов комплексного анализа данных. Мы полагаем, что первая группа сведений может запрашиваться как любыми интернет-пользователями, включая сотрудников федеральных и региональных служб и администраций, так и специалистами предметной области, включая учащихся и сотрудников образовательных

и научных учреждений. Вторая группа сведений запрашивается специалистами, выполняющими научные исследования. Для первой группы пользователей требуется обеспечить автоматическую загрузку, обработку и наглядное представление данных о свойствах природных и антропогенных процессов. Для второй группы пользователей требуется, чтобы ГИС наряду со стандартными операциями обеспечивала динамическую загрузку и интеграцию больших массивов данных с удаленных серверов и локальной сети пользователя, а также обладала большим набором инструментов для совместного анализа разнотипных пространственно-временных данных.

Предлагаемая геоинформационная технология мониторинга объединяет оба рассмотренных уровня анализа геоданных:

- *Первый уровень* поддерживает автоматическую обработку данных и доступный для широкого класса пользователей анализ результатов.
- *Второй уровень* предназначен для детального анализа гипотез, которые специалист может сформулировать на первом уровне.

Платформа мониторинга состоит из двух сетевых ГИС:

- *Первая ГИС* автоматически загружает и обрабатывает исходные данные, обеспечивает пользователя инструментами анализа процессов с интуитивно понятными операциями и упрощенным интерфейсом, осуществляет запуск вычислений на удаленном сервере и готовит ГИС-проект для второй ГИС.
- *Вторая ГИС* является многофункциональной системой, ориентированной на анализ пространственно-временных процессов, который выполняется специалистом.

Аналогичное решение по объединению двух уровней анализа используется в ArcGIS [9]: редактирование и администрирование карт выполняется с помощью ArcGIS Online, а углубленный анализ данных поддерживается с помощью ArcGIS Desktop [10].

3. ПЛАТФОРМА МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В АРКТИКЕ

3.1. Архитектура и функционал

Технология мониторинга обстановки Арктики реализуется на платформе, состоящей из двух сетевых ГИС: ГеоМонитор и ГеоТайм 3 (<http://distcomp.ru/geo/arctic>). ГИС ГеоМонитор построена в клиент-серверной архитектуре с тонким клиентом. Она поддерживает упрощенный анализ данных: отображение параметров пространственно-временных процессов, включая морских транспортных средств, эпицентров землетрясений, а также формирование задания и запуск на удаленном сервере моделирования разлива углеводородов. ГИС ГеоТайм 3 имеет клиент-серверную Java архитектуру с толстым клиентом. Она запускается с ГИС-проектом, автоматически подготовленным ГИС ГеоМонитор, и поддерживает функции детального анализа пространственно-временных процессов. При этом пользователь может дополнительно загружать в ГеоТайм 3 картографические основы в виде тайловых слоев и данные с произвольных удаленных серверов и своего ПК в форматах shape, grid, flt. Кроме того, пользователь может сохранять результаты работы в виде персонального ГИС-проекта.

Таким образом, платформа объединяет в себе простоту и доступность анализа в технологии с тонким клиентом с возможностями выполнения комплексного исследования данных в клиент-серверной архитектуре с толстым клиентом. Пользователи получают два уровня анализа данных: (1) выполняемый в географическом контексте Google Maps API экспресс-анализ природных и техногенных процессов, предназначенный для специалистов и вместе с

тем доступный для широкого круга пользователей, и (2) детальный анализ пространственных и пространственно-временных процессов, который выполняется специалистами. Тем самым ГИС-платформа существенно расширяет круг пользователей, предоставляя им как ознакомительную информацию о процессах в Арктике, так и возможность выполнения научных исследований.

Платформа обеспечивает доступ пользователей к анализу трех типов пространственных и пространственно-временных данных: архивным данным реанализа, оперативным наблюдениям и прогнозу. Эти данные представлены сеточными полями, полигонами и точечными полями. Информационные ресурсы (ИР) платформы загружаются с удаленных серверов. Они включают в себя:

1. Данные реанализа ERA-Interim за период 1979–2015 гг. (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>).
2. Данные оперативного среднесрочного (0–120 час) прогноза метеорологических полей GFS, NCEP/NOAA (ФГБУ “Гидрометцентр России”, <ftp://193.7.161.101/ippi>).
3. Данные о движении судов (ФГКУ “Администрация Северного морского пути”, <http://www.nspa.ru/>).
4. Данные оперативного прогноза скорости обледенения кораблей (по алгоритмам Overland and Pease at the Pacific Marine Environmental Research Laboratory, National Centers for Environmental Prediction, <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/omb/prod/>).
5. Оперативные ледовые карты Северного Ледовитого океана (ФГБУ “Арктический и антарктический научно-исследовательский институт” <http://wdc.aari.ru/datasets/d0015/arctic/sigrid/>).
6. Прогнозные данные моделирования разлива углеводородов (ФГБУ “Государственный Океанографический институт”).
7. Каталоги землетрясений (International Seismological Centre, ISC).
8. Тайловые карты GoogleMaps.

Стартовая страница платформы показана на Рис. 1. Пользователь может выбрать одно из двух приложений: Arctic и Barents Sea. При выборе первого приложения запускается ГИС ГеоМонитор с блоком анализа климатических процессов Арктики. Второе приложение запускает ГИС ГеоМонитор с блоком анализа оперативной и прогнозной обстановки в Баренцевом и Белом морях.

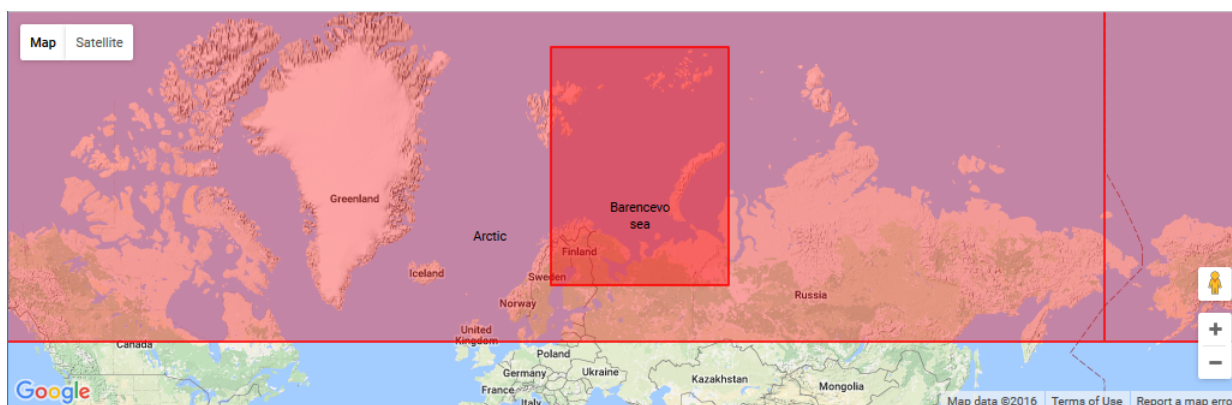


Рис. 1. Стартовая страница ГИС-платформы.

3.2. Блок климатических данных

Климатический блок ГИС ГеоМонитор представляет поля показателей климата Арктической зоны за последние 37 лет. Для этого используются данные реанализа ERA-Interim [11]. База данных ESMWF содержит более 120 гидрометеорологических характеристик. Большинство из них приводится в широтном интервале от 85° ю. ш. до 85° с.ш. с дискретностью от 3 до 12 ч в сетке от $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ до $3^\circ \times 3^\circ$.

Поля климатических показателей вычисляются по следующим гидрометеорологическим характеристикам: (1) температура подстилающей поверхности [К]; (2) температура воздуха на высоте 2 м [К]; (3) приземное давление [гПа]; (4) сплоченность льда (отношение площади, занятой льдом, к общей площади ячейки сеточного поля); (5) дивергенция поля скорости ветра на высоте 10 м; (6) ротор поля скорости ветра на высоте 10 м. Последние две характеристики вычислены по меридиональной и зональной составляющим скорости ветра [м/с].

Поля показателей представлены в ГИС ГеоМонитор в широтном интервале от 55° до 85° с.ш. с сеткой $0.75^\circ \times 0.75^\circ \times 30$ суток. Обработка исходных данных выполнялась на ГИС ГеоТайм 3 в несколько этапов: (1) загрузка всего исходного поля; (2) вырезка анализируемых 3D областей в пространственных координатах 55° – 85° с.ш. и по времени для интервалов $T_1=01.01.1979$ – $01.01.1998$ гг., $T_2=01.01.2006$ – $01.01.2015$ гг. и $T_3=01.01.1979$ – $01.01.2015$ гг.; (3) оценивание для интервалов T_1 и T_2 полей средних и среднеквадратичных отклонений для каждого месяца; (4) сдвиг полей средних и среднеквадратичных отклонений, вычисленных для временного интервала T_1 к дате 01.01.2006 г.; (5) вычисление полей значимости отклонения средних, равной отношению разности средних значений на интервалах T_2 , T_1 к среднеквадратичному отклонению этой разности (статистика Стьюдента) для соответствующих месяцев; (6) вычисление по данным интервала T_3 полей трендов для каждого месяца.

Таким образом, для каждого месяца ГИС ГеоМонитор представляет для каждой из перечисленных гидрометеорологических характеристик карты полей по следующим четырем климатическим показателям: (1) средние месячные значения на интервалах T_1 и T_2 , (2) среднеквадратичные отклонения значений на интервалах T_1 и T_2 , (3) значимости изменения средних значений характеристик на интервалах T_1 и T_2 , оцениваемые по статистике Стьюдента, и (4) тренды характеристик на интервале T_3 .

3.3. Примеры климатического анализа с помощью ГеоМонитор

Рассмотрим пример анализа показателя, который оценивает значимость изменения температурного режима подстилающей поверхности в арктических широтах. На Рис. 2 и 3 показаны карты значимости изменения среднемесячных температур подстилающей поверхности для интервалов $T_1=1979$ – 1998 гг. и $T_2=2006$ – 2015 гг. за январь, март, май, июль, сентябрь и ноябрь (статистика Стьюдента, равная нормированной по среднеквадратичному отклонению разности средних на интервалах T_2 и T_1). На картах можно видеть, что в “зимние” месяцы (январь, ноябрь) в период 2006–2015 гг. по сравнению с периодом 1979–1998 гг. температуры значительно повысились (желтые и коричневые цвета), а в “летнее” время (май, июль) температуры понизились (синие тона). Кроме того, на картах видно, что изменения температуры в пространстве неоднородны.

На Рис. 4 и 5 показаны карты линейных трендов среднемесячных температур воздуха на высоте 2 м для интервала $T_3=1979$ – 2015 гг. за январь, март, май, июль, сентябрь и ноябрь [$^\circ\text{C} \times 10/\text{год}$]. Для всех месяцев на картах можно видеть тенденцию линейного роста температуры на широтах выше 70° с.ш. (желтые и коричневые тона). В летние месяцы на широтах ниже 70° с.ш. можно видеть тенденцию понижения температуры (синие тона).

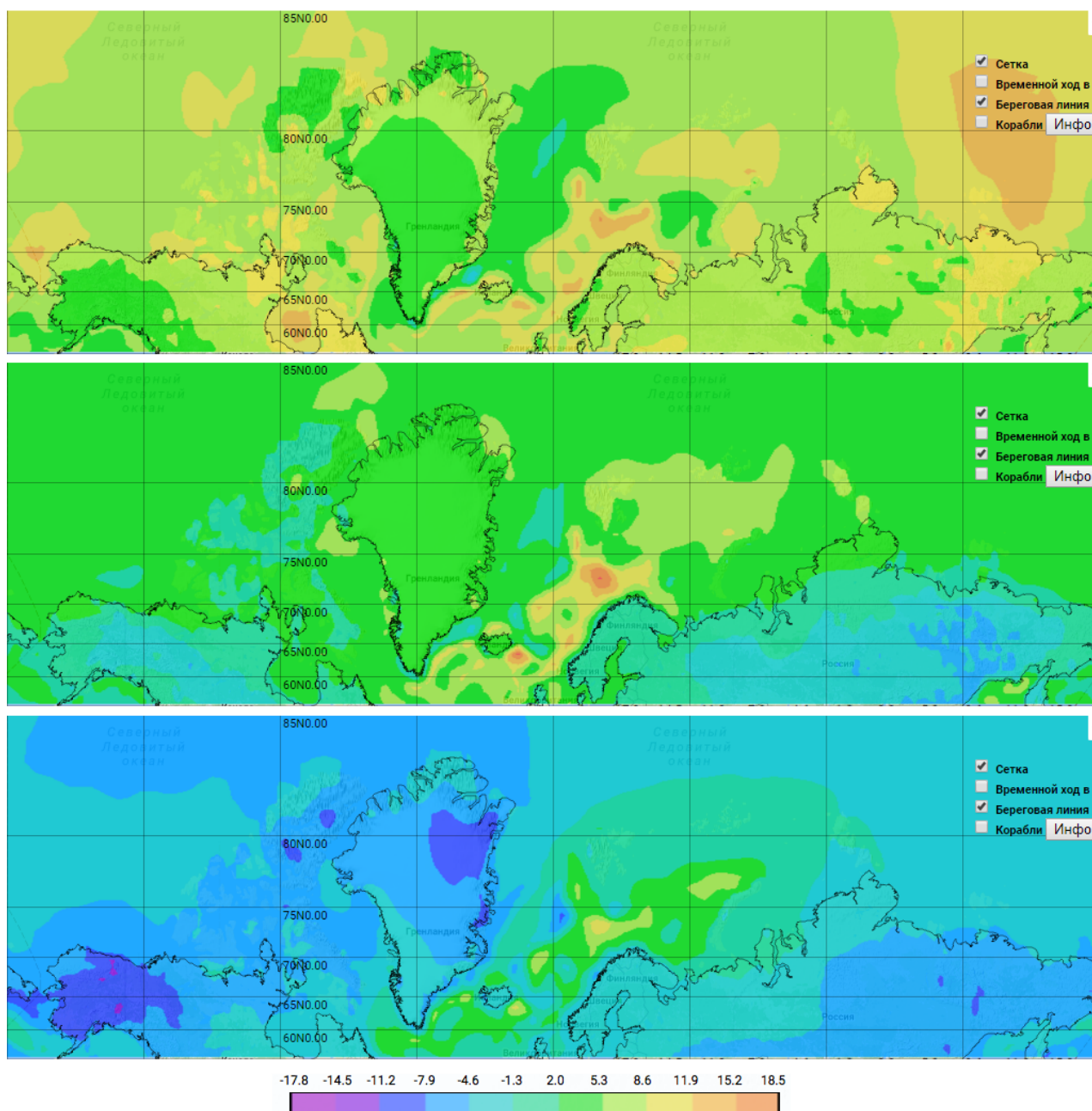


Рис. 2. Временные срезы поля значимости изменения среднемесячной температуры для интервалов 2006–2015 гг. и 1979–1998 гг., сверху вниз: январь, март, май.

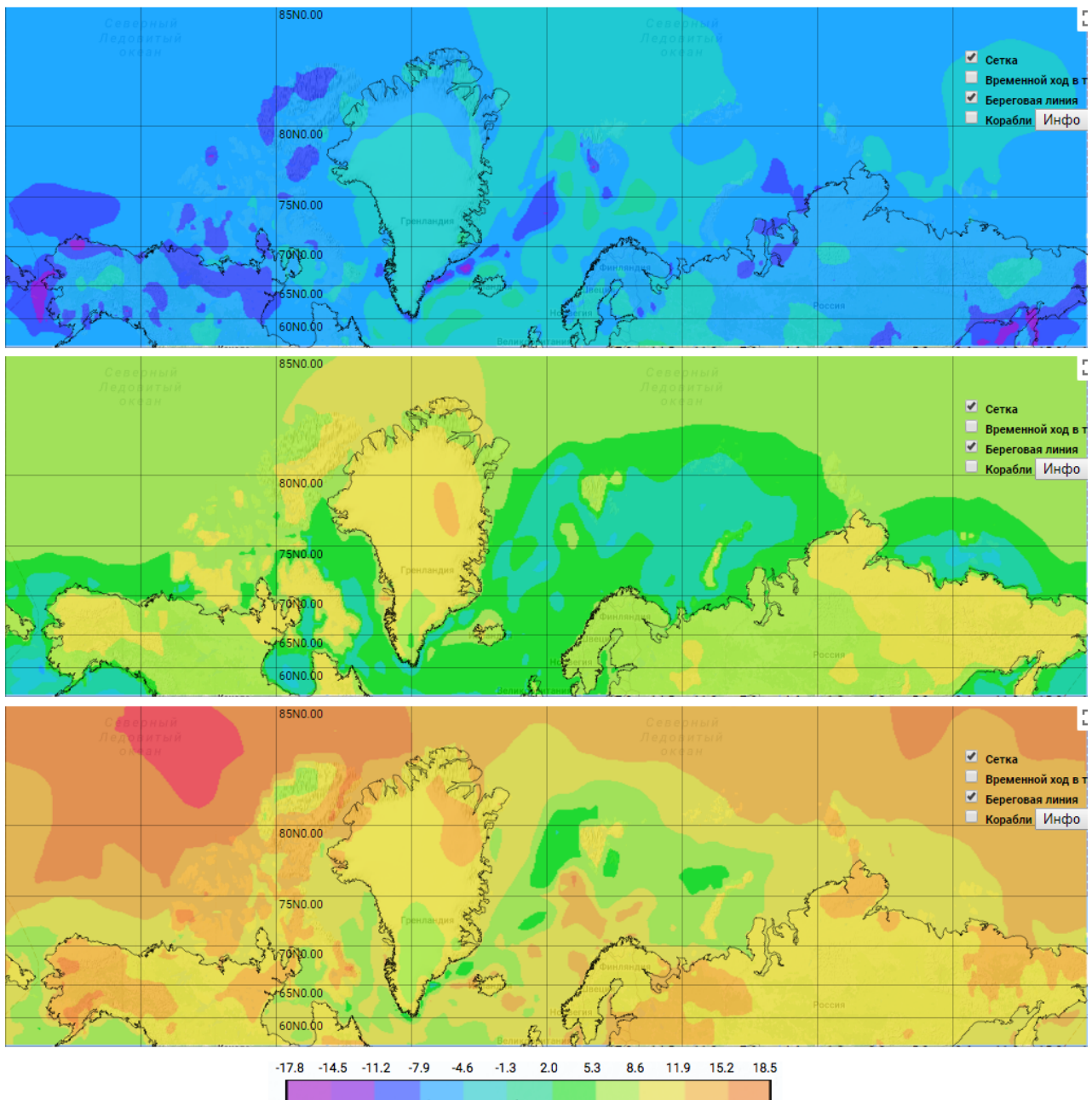


Рис. 3. Временные срезы поля значимости изменения среднемесячной температуры для интервалов 2006–2015 гг. и 1979–1998 гг., сверху вниз: июль, сентябрь, ноябрь.

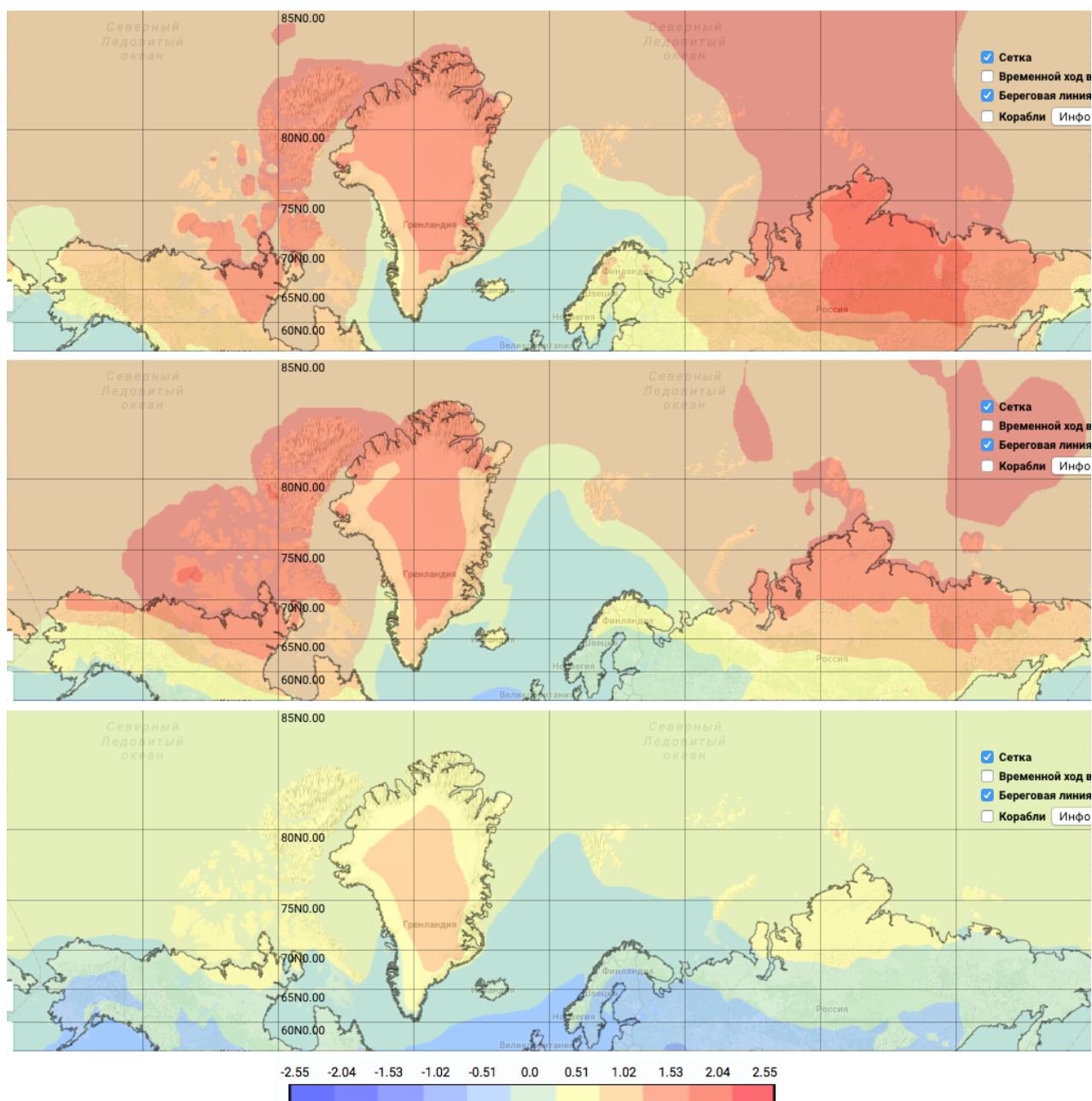


Рис. 4. Карты линейных трендов среднемесячных температур воздуха на высоте 2 м для интервала $T_3=1979-2015$ г.г., сверху вниз: январь, март, май [$^{\circ}\text{C} \times 10 / \text{год}$].

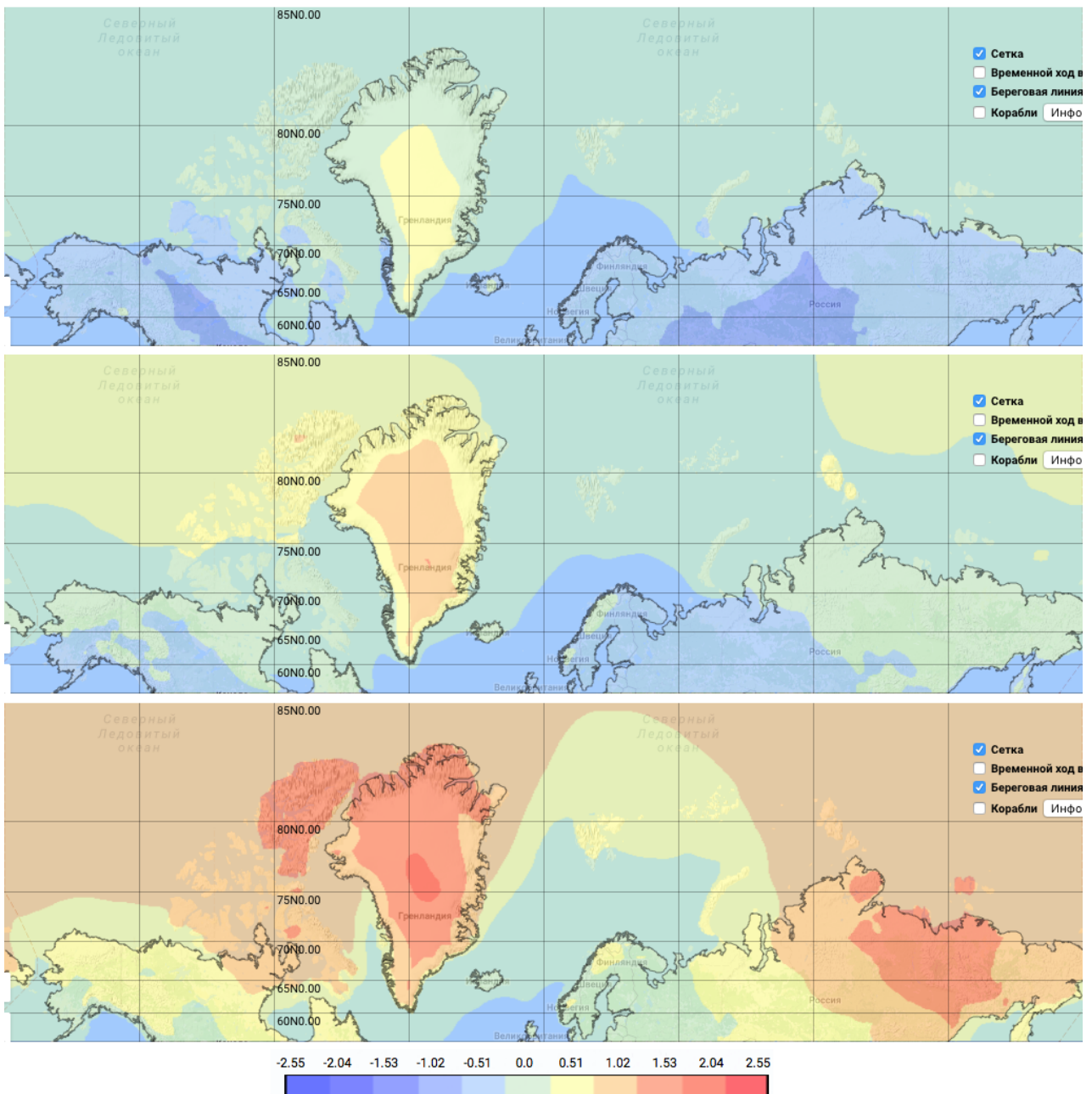


Рис. 5. Карты линейных трендов среднемесячных температур воздуха на высоте 2 м для интервала $T_3=1979-2015$ гг., сверху вниз: июль, сентябрь и ноябрь [$^{\circ}\text{C} \times 10/\text{год}$].

На Рис. 6. показаны карты средних значений покрытия льдом в [%] в январе для интервалов $T_1=1979-1998$ гг. (вверху) и $T_2=2006-2015$ гг. (внизу). На графиках показаны зависимости среднего значения покрытия льдом в [%] в точке 70° с.ш., 62° в.д. (показана крестиком $\langle x \rangle$) для интервалов T_1 и T_2 по месяцам от января до декабря. Можно видеть, что в зимние месяцы (декабрь, январь, февраль, март) ледовое покрытие заметно изменилось. Кружками на рисунке показаны эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 4.0$, произошедшие за последние 32 недели от 15.11.2017 г. Стрелочкам показаны морские суда.

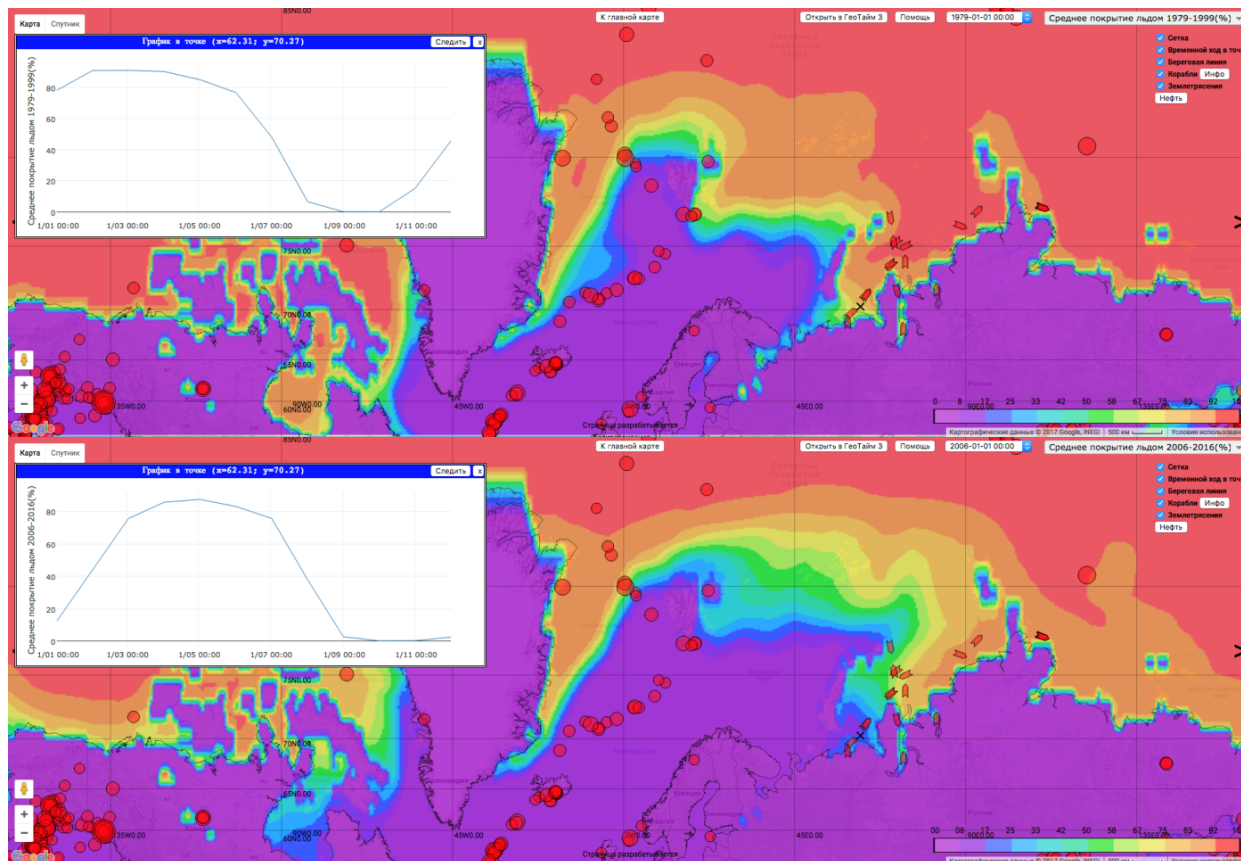


Рис. 6. Карты средних значений покрытия льдом в [%] в январе для интервалов $T_1=1979-1998$ гг. (вверху) и $T_2=2006-2015$ гг. (внизу). Можно видеть, что ледовое покрытие изменилось. На графиках: зависимости среднего значения покрытия льдом в [%] в точке 70° с.ш., 62° в.д. (показана $\langle x \rangle$) для интервалов T_1 и T_2 по месяцам от января до декабря. Кружками показаны эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 4.0$, произошедшие за последние 32 недели от 15.11.2017 г. Стрелочкам показаны морские суда.

На Рис. 7 показаны графики значений линейных трендов среднемесячных температур воздуха на высоте 2 м для точек 80° с.ш., 40° в.д.; 75° с.ш., 40° в.д.; 70° с.ш., 40° в.д.; 65° с.ш., 40° в.д. [$^\circ\text{C}/\text{год}$]. В таблице 1 для этих точек даны максимальные и минимальные значения трендов с указанием месяца. Из таблицы видно, что разброс среднемесячных температур в анализируемых точках имеет тенденцию к уменьшению: в зимние месяцы температура повышается, а в летние – понижается.

3.4. Пример климатического анализа с помощью GeoТайм 3

ГИС GeoТайм 3 (<http://www.geo.iitp.ru/GT3/>) предназначена для отображения, анализа и моделирования векторной и сеточной географической информации о пространственно-времен-

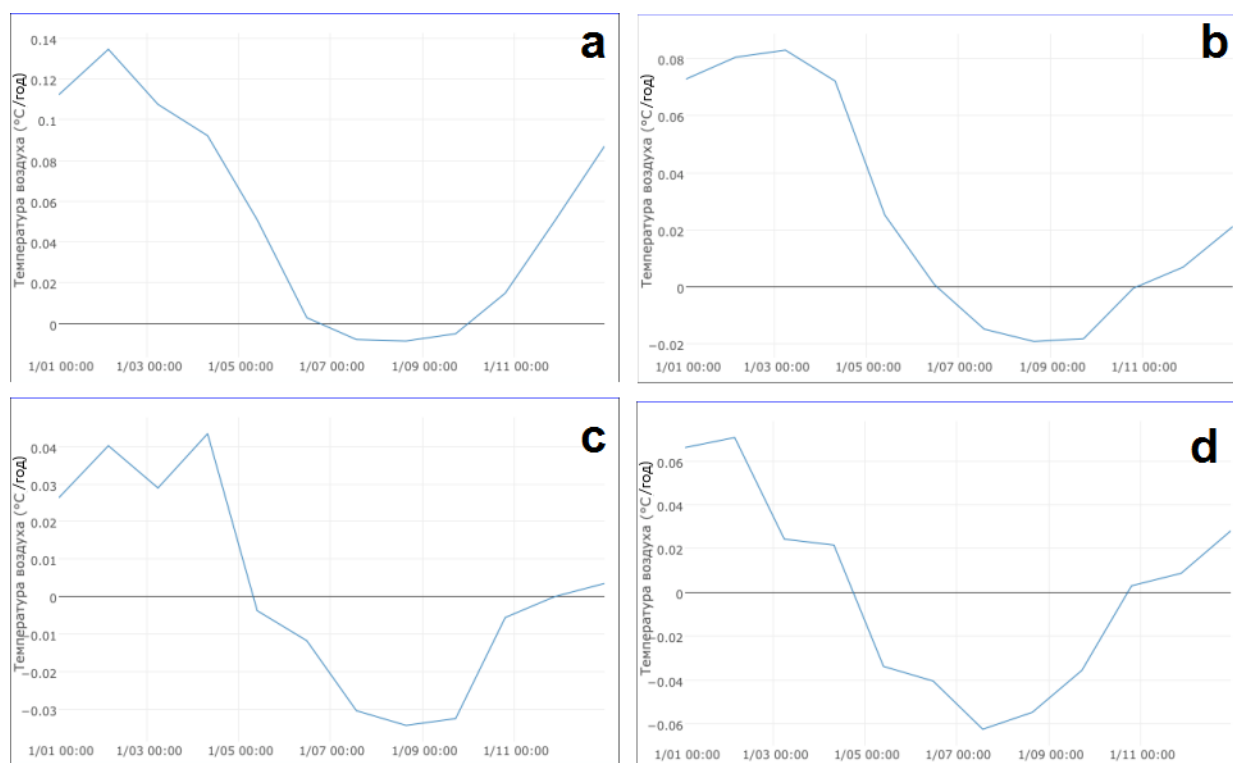


Рис. 7. Графики значений линейных трендов среднемесячных температур воздуха на высоте 2м в точках: а) 80° с.ш., 40° в.д.; б) 75° с.ш., 40° в.д.; в) 70° с.ш., 40° в.д.; д) 65° с.ш., 40° в.д. [°C/год].

Таблица 1. Максимальные и минимальные значения трендов [°C/год] в точках анализа

Координаты точки	Максимум тренда, месяц	Минимум тренда, месяц
80° с.ш., 40° в.д.	0.135, февраль	-0.01, июль
75° с.ш., 40° в.д.	0.083, март	-0.02, август
70° с.ш., 40° в.д.	0.043, апрель	-0.04, август
65° с.ш., 40° в.д.	0.071, февраль	-0.06, июль

ных процессах. Она обладает развитой функциональностью, высокой интерактивностью, независимостью от платформы и от браузера, возможностью работы с распределенными информационными и вычислительными ресурсами и гибкой настройкой функционала на задачу пользователя, которая обеспечивается модульной организацией аналитического инструментария.

ГИС ГеоТайм 3 запускается со страницы ГИС ГеоМонитор с теми же данными, которые перед этим в ней анализировались. При этом инструменты ГеоТайм 3 позволяют пользователю дополнить ГИС-проект тайловыми картами и 2D, 3D, 4D точечными, векторными и сеточными данными с удаленных и локальных серверов. ГИС поддерживает совместную обработку всех перечисленных выше типов данных. В стандартных ситуациях ГИС автоматически анализирует типы слоев, типы координат, параметры координатной привязки, после чего предлагает пользователю набор допустимых операций и параметры обработки по умолчанию. Основные операции визуального анализа поддерживают (1) интерактивное представление данных в виде карт, разрезов, графиков, диаграмм и таблиц; (2) анимационную визуализацию одного или нескольких пространственно-временных процессов; (3) измерение расстояний, площадей и атрибутов; (4) оценивание статистик процессов в заданных и произвольных зонах региона. Основные операции аналитического моделирования поддерживают (1) вычисление локальных и комплексных свойств процессов; (2) агрегацию свойств процессов с помощью статистик 3D полей; (3) кластерный анализ пространственно локализованных временных рядов; (4) вычисле-

ние сеточных полей пространственно-временных свойств векторных объектов; (5) вычисление атрибутов векторных объектов; (6) обнаружение зон со сходной динамикой процессов. Кроме того, в GeoТайм 3 разработан ряд плагинов для исследования сейсмологических процессов. Они позволяют выделять из каталога землетрясений кластерную составляющую сейсмического потока, оценивать поля пространственно-временных свойств сейсмического процесса, обнаруживать в них аномальные изменения, оценивать информативность предвестников землетрясений, обучать и тестировать поле прогноза землетрясений.

Рассмотрим результат анализа изменения среднегодовых значений температуры и ледового покрытия в широтах от 55° с.ш. до 85° с. ш в интервале $T_2=2006-2015$ гг. по сравнению с интервалом $T_1=1979-1998$ гг. Для этого использовались инструменты сеточных вычислений, оценивания зональных статистик и средства визуализации. Анализ показал: среднегодовая температура подстилающей поверхности увеличилась на 0.71° , среднегодовая температура на высоте 2 м от подстилающей поверхности увеличилась на 0.63° , а среднегодовое ледовое покрытие уменьшилось на 2.54%.

На рис. 8 показана карта разности среднегодовых температур подстилающей поверхности за периоды T_2 и T_1 . На карте видно, что наибольшее увеличение средней температуры в 4–5 градусов приурочено к области, расположенной вблизи 75° с.ш., 65° в.д., а наибольшее уменьшение средней температуры имеет место вблизи Гренландии. В нижней части рисунка слева показан разрез поля по линии около 80° с.ш. Разрез показывает изменение температуры вдоль кратчайших дуг между точками 80-й параллели, выбранными с интервалом 60° (дуги и точки изображены на карте красным цветом). Внизу справа показана гистограмма значений поля. Можно видеть: что максимальные изменения средней температуры на интервале T_2 по сравнению с интервалом T_1 составляют понижение до 2° и повышение до 6° . Мода вероятностного распределения изменения температуры относится к интервалу $1^\circ-2^\circ$.

3.5. Блок оперативных данных

Анализ оперативных данных и прогноза обстановки в Белом и Баренцевом представляет интерес для всех участников морской деятельности [12]. В связи с увеличением в регионе антропогенной нагрузки блок оперативных данных помимо гидрометеорологических характеристик содержит оперативную информацию о движении судов, о прогнозе скорости их обледенения и о прогнозе развития аварийных ситуаций, связанных с разливом углеводородов. Объединение прогностических данных по основным гидрометеорологическим показателям с данными моделирования разлива углеводородов, информацией о положении судов и условиях судоходства помогает планировать мероприятия по уменьшению ущерба.

Данные мониторинга оперативной обстановки Белого и Баренцева морей автоматически обновляются. Они состоят из наблюдаемых значений показателей и прогноза. По этим данным ГИС ГеоМонитор представляет следующий набор пространственно-временных полей: (1) модуль скорости ветра на высоте 10 м от подстилающей поверхности [м/с]; (2) интенсивность выпадения осадков [мм/час]; (3) атмосферное давление на подстилающей поверхности [гПа]; (4) температура подстилающей поверхности [$^\circ\text{C}$]; (5) температура воздуха на высоте 2 м [$^\circ\text{C}$]; (6) удельная влажность воздуха (масса воды в одном кг воздуха) [г/кг]; (7) скорость обледенения, равная приросту толщины льда в [мм/час]: лёгкое обледенение – 0.1–6.858 мм/час; умеренное обледенение – 6.858–20.32 мм/час, тяжёлое обледенение – более 20.32 мм/час; (8) сплоченность льда. В летний период (1.06–30.09) карты сплоченности льда отображают распределение льда по обобщенным градациям сплоченности (концентрации): 1–6 и 7–10 баллов и припай. В зимний период (1.11–31.05) карты отображают распределение льда по обобщенным градациям возраста (толщины льда) – молодые (переходная стадия между начальными видами льдов и однолетним, толщиной от 10 до 30 см.), однолетние (просуществовавшие не

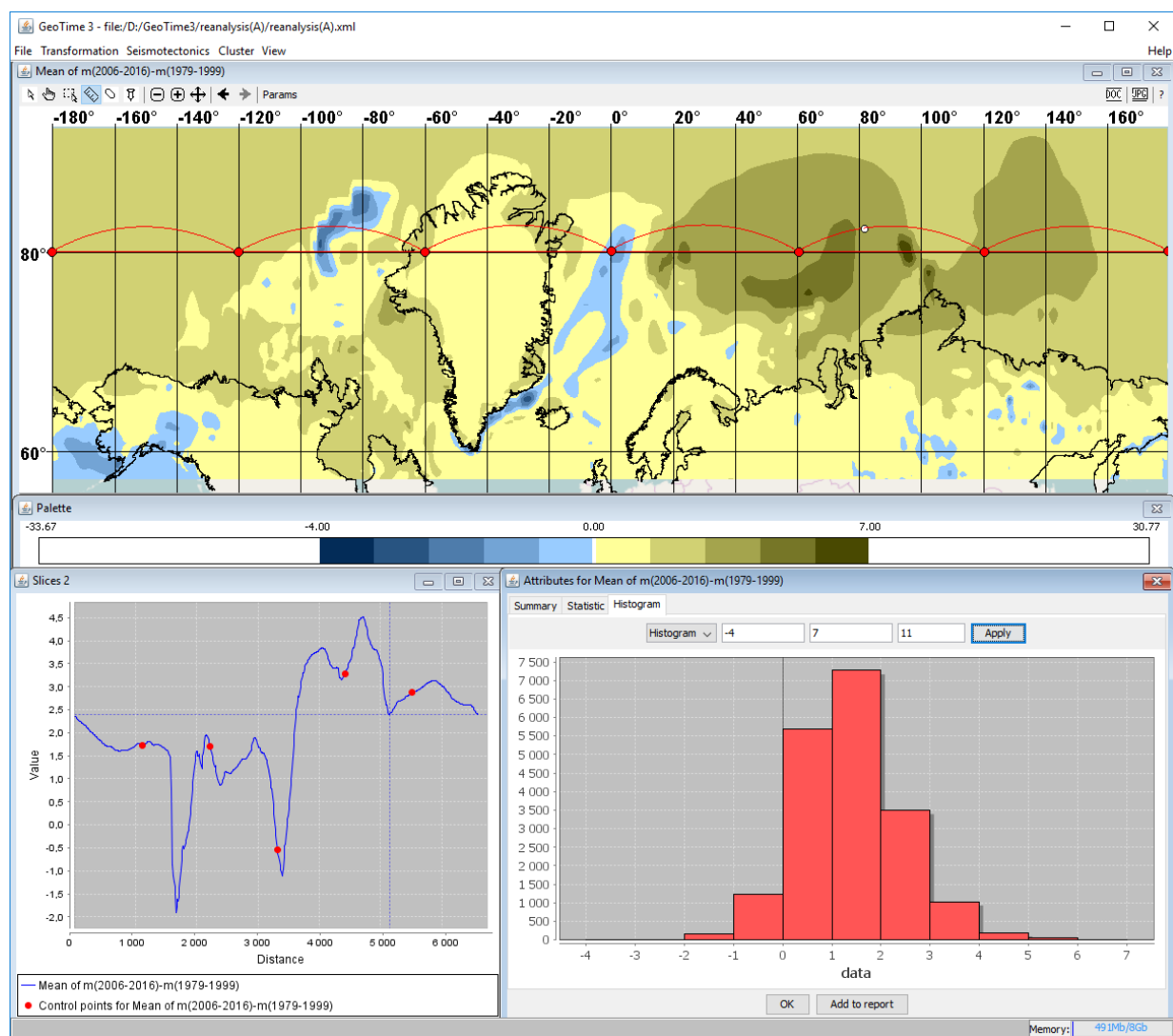


Рис. 8. Карта разности среднегодовых температур подстилающей поверхности за периоды 2006–2015 гг. и 1979–1998 гг. В нижней части слева: разрез поля по дугам вдоль 80° с.ш. (Дуги соответствуют кратчайшим линиям между точками -180° , -120° , -60° , 0° , 60° , 120° , 180° . Дуги и точки изображены на карте красным цветом). Внизу справа: гистограмма значений поля.

более одной зимы, толщина от 30 см до 2-х метров) и многолетние (существующие более одной зимы) [13].

Поля (1)–(6) представлены в узлах сетки 0.117149° по широте, 0.1171875° по долготе и 6 часов по времени. Стартовое время прогноза 00 час (по UTC). Прогноз дается на 120 часов. Поле (7) представлено в узлах сетки с шагом 1° по широте, 1° по долготе и 6 часов по времени. Стартовое время прогноза 00 час (по UTC). Прогноз дается на неделю. Полигоны поля (8) представляют усредненные за период от 2-х до 5-ти суток данные сплоченности льда. Поле обновляется раз в неделю (по четвергам).

Оперативные данные о движении судов и эпицентрах землетрясений за последние 32 недели с магнитудой $M \geq 2.5$ ежедневно обновляются. Интерактивный интерфейс пользователя ГИС ГеоМонитор позволяет читать атрибутивную информацию: для судов – название, тип, направление движения и величину скорости, для эпицентров землетрясений – время землетрясения, магнитуду и глубину гипоцентра.

3.6. Примеры анализа оперативных данных с помощью ГеоМонитор

Оперативные и прогнозные гидрометеорологические данные в основном представлены пространственно-временными полями. На Рис. 9 показаны оперативная и прогностические карты скорости ветра на а) 00 часов, б) 06 часов, в) 12 часов и д) 18 часов 21 августа 2017 г.

На рис. 10 показаны графики прогностических значений гидрометеорологических параметров в точке 70° с.ш., 40° в.д. на 21–26.08.2017 г.: (а) скорости ветра, (б) скорости выпадения осадков, (в) давления на подстилающей поверхности, (д) температуры на подстилающей поверхности, (е) температуры воздуха на высоте 2м и (ф) удельной влажности.

Для авторизованного пользователя ГИС-ГеоМонитор поддерживает анализ распространения нефти или нефтепродуктов при разливах углеводородов. Нефтепродукты могут попадать в окружающую среду вследствие аварии танкеров, аварии на нефтяных платформах, буровых установках и скважинах. Ликвидация последствий разлива нефтепродуктов может занимать от нескольких месяцев до нескольких лет. Наиболее эффективными являются мероприятия по ликвидации последствий, которые могут быть выполнены в первые десятки часов после разлива. При этом задачи оператора состоят в том, чтобы (1) составить прогноз по распространению нефтяного пятна, (2) подготовить метеограмму, содержащую сведения о метеорологических условиях в месте разлива нефти и по маршруту следования сил и средств реагирования в район аварии, (3) передать подготовленные результаты прогнозирования в координационный центр для принятия решения о возможности привлечения средств реагирования в районе ЧС и доставки туда соответствующего оборудования.

Для прогноза положения и параметров пятна загрязнения производится имитационное моделирование. Метод моделирования разработан в Государственном океанографическом институте имени Н.Н. Зубова Росгидромета (ГОИН) [14, 15]. Расчетно-модельный комплекс “Экспресс-анализ аварийных разливов нефти и нефтепродуктов” реализован как многопользовательское серверное приложение и размещен на вычислительных ресурсах ГОИНа. Для работы приложения на серверы ГОИН в режиме 24/7 (непрерывно двадцать четыре часа, семь дней в неделю) поступают региональные оперативные гидрометеорологические прогнозы.

Предполагается, что работа по моделированию разлива нефтепродуктов происходит следующим образом.

1. Формирование задания и передача параметров моделирования из ГеоМонитор на сервер ГОИН.

В диалоговом окне ГеоМонитор задаются параметры моделирования: заблаговременность прогноза распространения нефти или нефтепродукта, шаг визуализации расчетных параметров, тип нефтепродукта, дата и время аварии, координаты точки разлива, интенсивность и продолжительность сброса нефтепродукта. Точка разлива нефтепродукта выбирается либо путем указания значений ее координат в соответствующих полях окна, либо с помощью нанесения этой точки курсором на карте. После этого для авторизованного пользователя параметры моделирования из ГИС ГеоМонитор через web-сервис передаются на сервер ГОИН.

2. Вычисление на сервере ГОИН на каждом шаге моделирования координат, формы и атрибутов для градаций толщины пленки разлива.

При моделировании используются заданные на предыдущем шаге параметры, береговая линия, ледовая обстановка, метеорологический прогноз и другие данные о состоянии природной среды, получаемые с серверов Росгидромета. Для инициализации модели разлива используется информация не только о положении кромки льда, но и атрибутивная информация о типах, стадии развития и сплоченности льда. При этом указываются возраст льда, толщина, степень раздробленности и т.д. Моделирование выполняется для конфигурации,

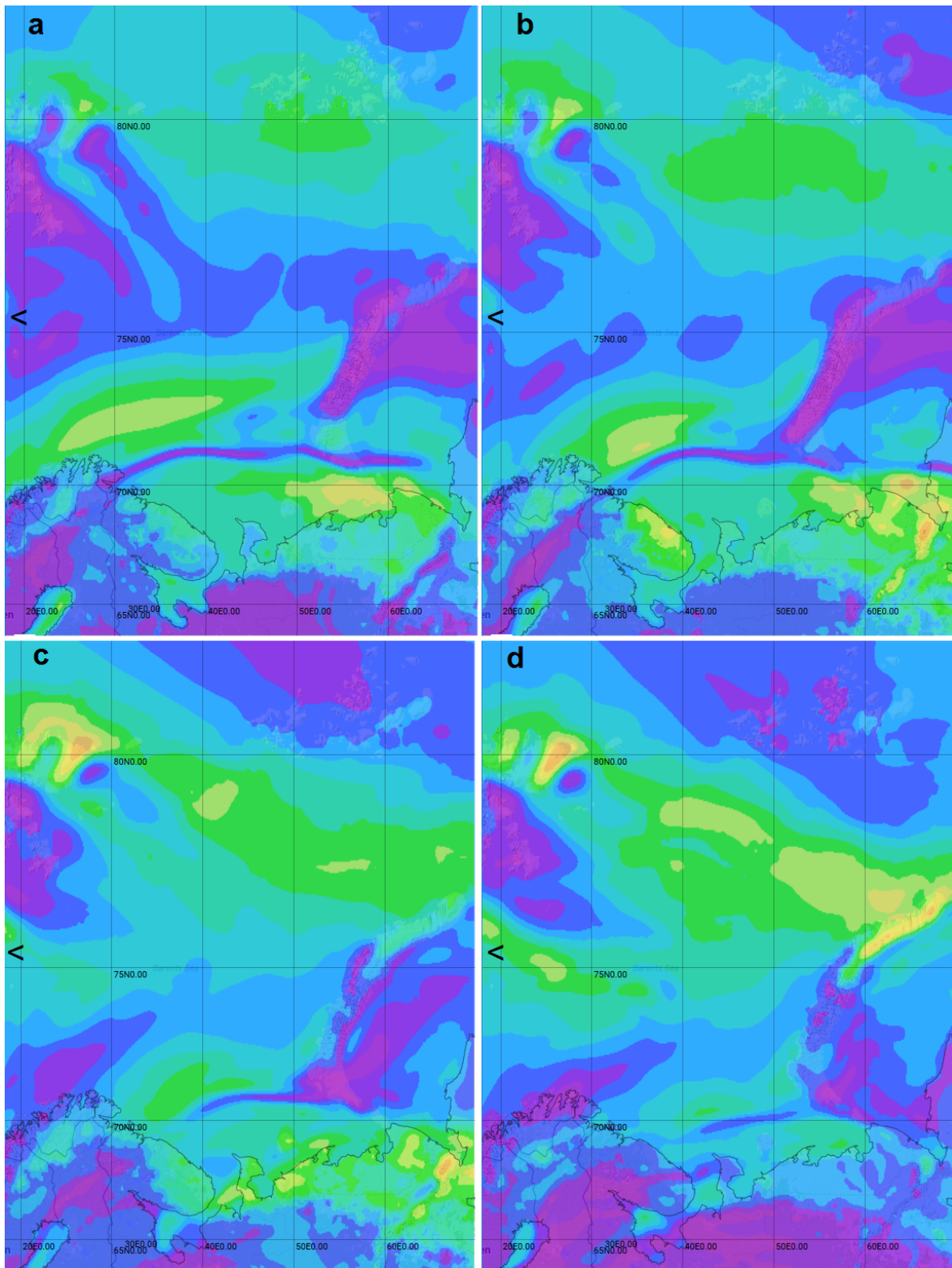


Рис. 9. Оперативная (а) и прогностические карты скорости ветра на а) 00, б) 06, с) 12 и д) 18 часов 21 августа 2017 г.

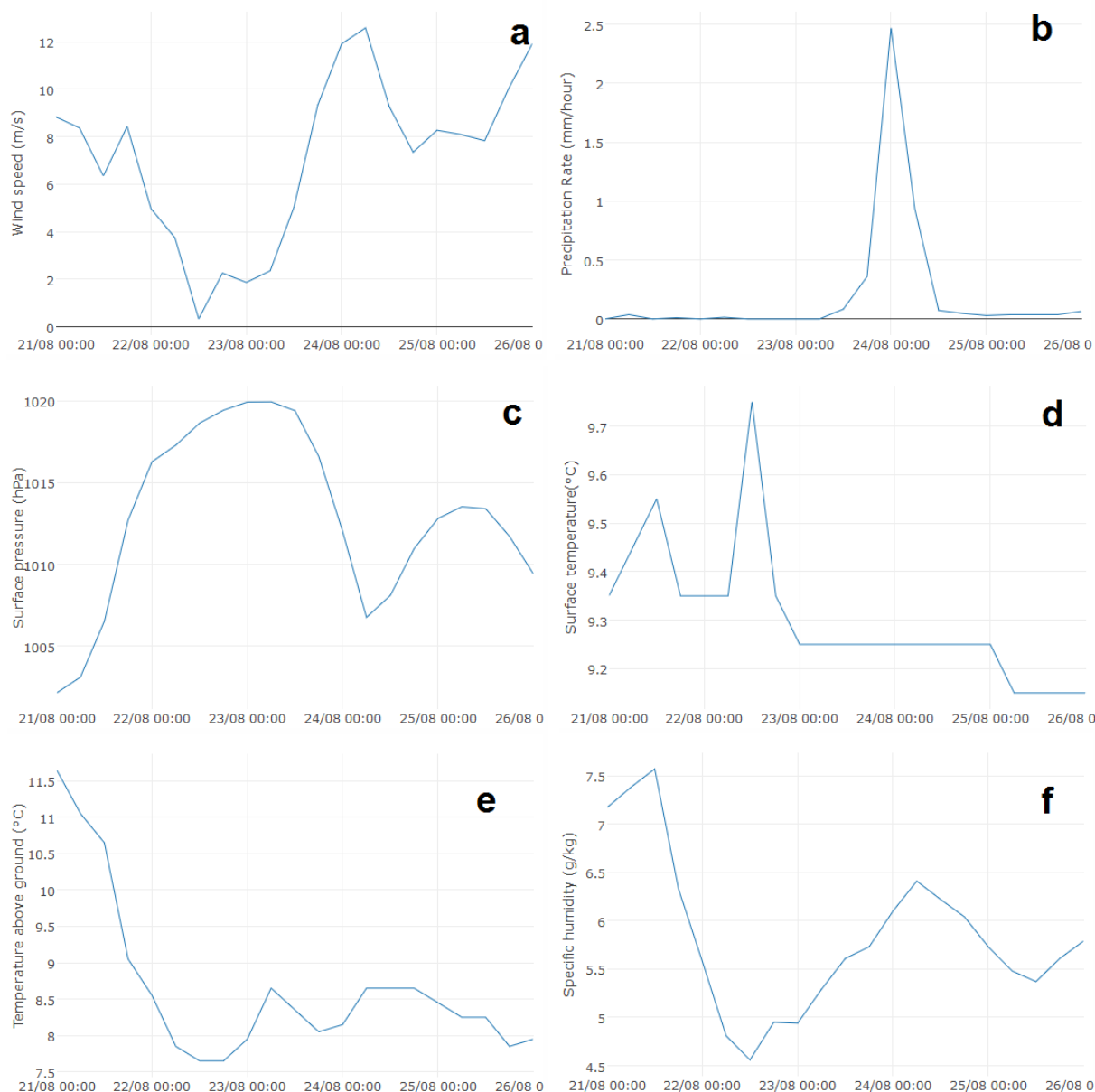


Рис. 10. Прогностические значения гидрометеорологических параметров в точке 70° с.ш., 40° в.д. на 21–26.08.2017 г.: а) скорость ветра (м/с); б) скорость выпадения осадков (мм/ч); в) давление на подстилающей поверхности (гПа); д) температура на подстилающей поверхности (°С), е) температура воздуха на высоте 2 м (°С); ф) удельная влажность (г/кг).

при которой лед и нефть плавают на поверхности воды и толщина льда значительно превышает толщину пленки. Поэтому задача моделирования разлива нефти по поверхности моря, частично покрытого льдом, рассматривается как задача обтекания некоторой структуры с подвижной или неподвижной контактной границей. Если ледовый массив покоится, то кромка льда рассматривается как фиксированная контактная граница, на которой задаются условия непротекания. При растекании нефти в разводьях лед практически не загрязняется, т.к. боковая инфильтрация в него незначительна. Но при сжатии и торошении льда нефть заплескивается как на его поверхность, так и уходит под ледяной покров. Если ледовый массив с размерами, значительно превышающими масштабы нефтяного разлива,

движется, то условие непротекания заменяется условием равенства нормальных компонент скоростей льда и нефти.

Для решения задачи о распространении нефти с граничными условиями, заданными на подвижной границе области лед-нефть, применяется эйлерово-лагранжевый метод моделирования движения сплошной среды. Области ледового покрова, дешифрованные как припайный лед, рассматриваются как непроницаемые для движения нефти границы и, фактически, представляют собой новые граничные условия для распространения нефтяных разливов.

Для каждого шага моделирования вычисляется файл с координатами полигонов для каждой градации толщины нефтяной пленки с соответствующими атрибутами и размещается на сервере ГОИН. Web-сервис сообщает о выполнении очередного шага расчетов.

3. Загрузка и агрегация результатов каждого шага моделирования в ГИС ГеоМонитор.

По получению сообщения о завершении очередной итерации ГИС ГеоМонитор загружает данные прогноза разлива нефти как последовательные конфигурации области нефтяного загрязнения с дифференциацией по толщине нефтяной пленки. После этого пользователь может отобразить на интерактивной карте пространственно-временную модель разлива нефти для каждого шага моделирования.

Для принятия решения о доставке средств ликвидации аварии оператор использует средства картографии ГИС ГеоМонитор. При этом могут применяться операции пошаговой визуализации изменения положения и формы модели пятна, чтение атрибутов пятна, визуализация координат, скоростей, названий, идентификаторов и других атрибутов морских судов, визуализация пространственно-временных прогнозных гидрометеорологических карт и графическое представление гидрометеорологических временных рядов в интерактивно выбираемых точках региона.

Рассмотрим пример применения ГИС ГеоМонитор к анализу аварийного разлива углеводородов. На Рис. 11 показано окно параметров разлива нефтепродуктов: продолжительность вычислений 24 часов, шаг расчета 1 час, тип нефти – легкая нефть, дата аварии 19.11.2017, 15:39, координаты 69.88° с. ш., 60.73° в. д., интенсивность сброса 6000 т.час, продолжительность сброса 5 часов.

На Рис. 12. Показаны карты временных срезов поля моделирования положения и формы пятна разлива нефти через 1, 4, 7 (слева направо, верхний ряд), 10, 13 и 16 (слева направо, нижний ряд) часов после разлива. Точка разлива показана крестиком. Вначале нефтяное пятно покрывает точку начала разлива, так как продолжительность сброса составляет 5 часов. Максимальная толщина нефтяной пленки при этом равна 5.58. Затем под воздействием ветра и течения пятно перемещается на север и растекается. После 10 часов от начала разлива по прогнозу направление ветра изменилось на юго-западное, и направление движения пятна изменилось. На последнем временном срезе видно, что пятно покрывает берег. При этом максимальная толщина нефтяной пленки достигает 9.28 мм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевые задачи, на решение которых нацелен мониторинг обстановки в российской Арктической зоне, связаны с исследованием пространственных и пространственно-временных данных. Рассмотренная версия платформы мониторинга имеет два приложения: (1) климатические процессы в Арктике и (2) оперативная и прогнозная обстановка в регионах Белого и Баренцева морей с возможностью анализа экологической угрозы при добыче и транспортировке углеводородов.

Предлагаемая технология мониторинга объединяет два уровня анализа геоданных: первый уровень поддерживает автоматическую загрузку, обработку, а также простой и наглядный

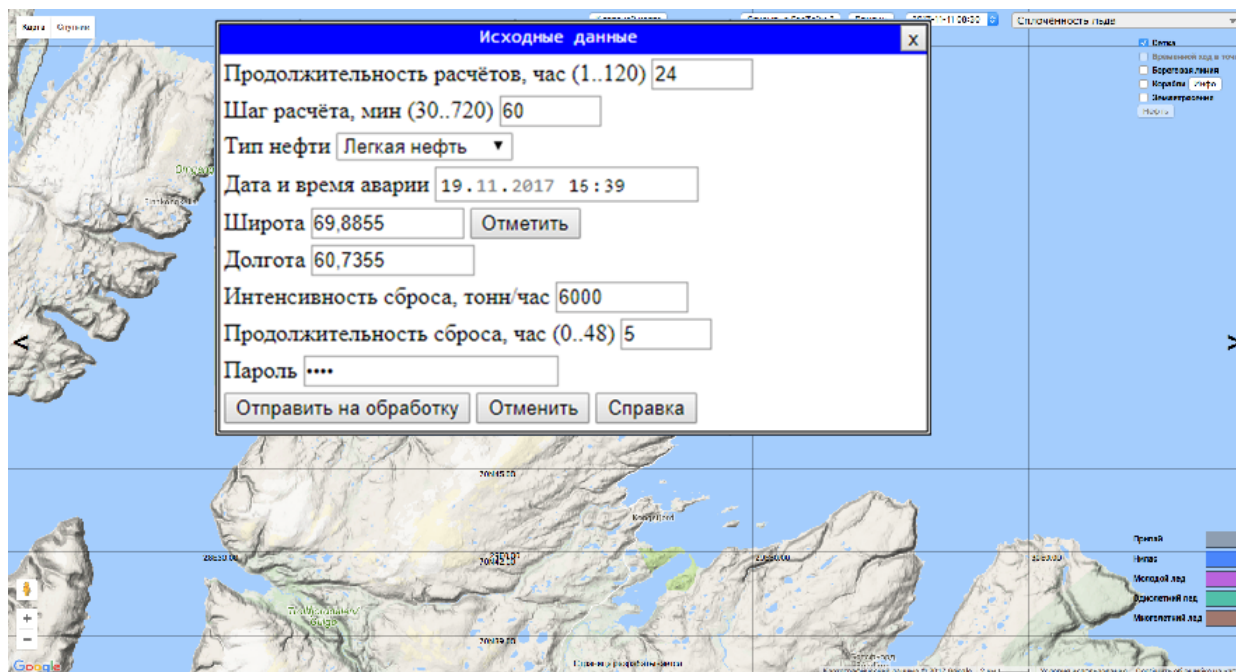


Рис. 11. Окно параметров разлива нефтепродуктов.

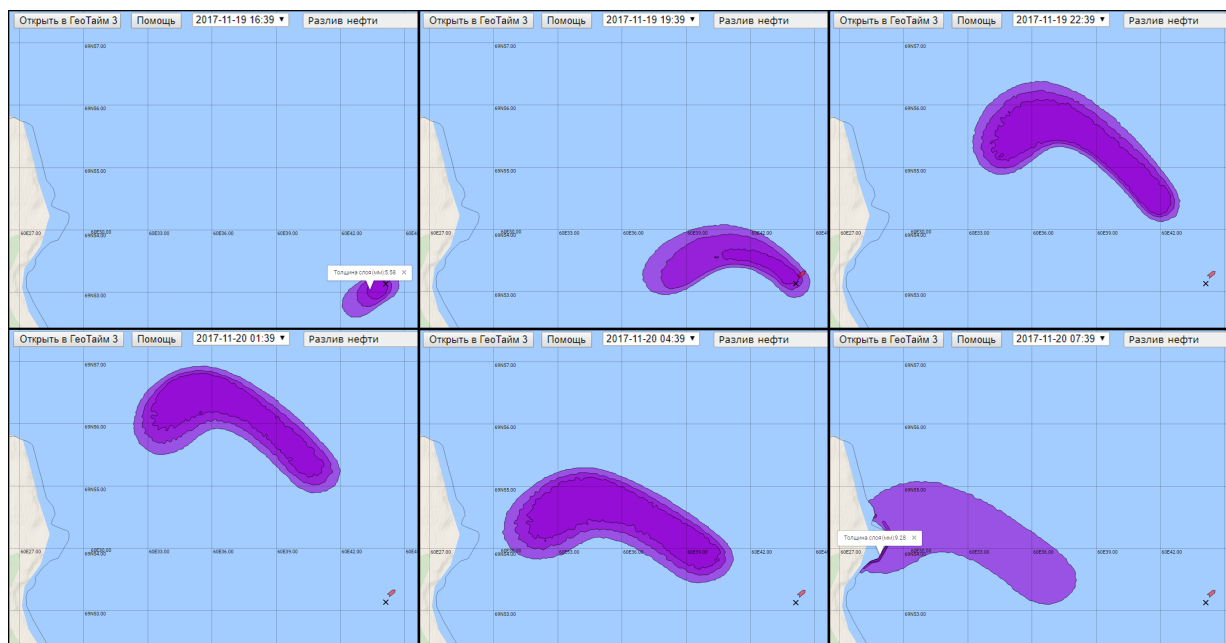


Рис. 12. Временные срезы прогноза положения и формы пятна разлива нефти через 1, 4, 7 (слева направо, верхний ряд), 10, 13 и 16 (слева направо, нижний ряд) часов после разлива. Точка разлива показана крестиком.

анализ данных; второй уровень предназначен комплексного анализа данных. При этом ГИС-проект для второго уровня анализа генерируется автоматически. Тем самым ГИС-платформа удобна для всех пользователей. Они получают ознакомительную информацию о процессах в Арктике и имеют возможность выполнять научные исследования.

Рассмотренная реализация платформы мониторинга гидрометеорологической обстановки в Арктике демонстрирует лишь несколько инструментов геоинформационного анализа пространственно-временных данных. Платформа оперирует с относительно небольшим количеством характеристик. Предлагаемая технология мониторинга позволяет достаточно легко настроить платформу на другую задачу анализа процессов в окружающей среде. При этом можно существенно увеличить количество входных характеристик и вычисляемых по ним показателей, а также расширить состав аналитических инструментов. Это обеспечивается модульным принципом организации ГИС.

Авторы благодарят инженера – разработчика ИТ отдела информационного обеспечения морской и водохозяйственной деятельности ГОИНа Романа Кузнецова за разработку специального web-сервиса по моделированию разлива нефти на сервере ГОИН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. - 2012. - Т. 2. - С. 66-79.
2. Overland, J. E., Wang, M., Walsh, J. E., & Stroeve, J. C. Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales. *Earth's Future*, 2014, 2(2), 68-74.
3. Семилетов. И. П., Дударёв, О. В., Дмитриевский, Н. Н., Шахова, Н. Е., Романовский, Н. Н., Космач, Д. А., Никольский Д. Н., Никифоров С. Л., Саломатин А. С., Ананьев Р. А., Росляков А. Г., Салюк А. Н., Карнаух В. В., Черных Д.Б., Тумской В. Е., Юсупов В. И., Куриленко А. В., Чувилин Е. М., Буханов Б. А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы:” некоторые результаты комплексных исследований 2011 года. Доклады Академии наук Том. 446, № 3, с. 330-335). (2012).
4. Зеленина Л. И., Федькушова С. И. Прогнозирование и последствия изменения климата Арктического региона // Арктика и Север. - 2012. - № 5.
5. Михайлов Н.Н. Облик ЕСИМО - решения, характеристики и основные направления применения и развития. // Материалы конференции “Использование средств и ресурсов Единой государственной системы информации об обстановке в мировом океане для информационного обеспечения морской деятельности в Российской Федерации” (ЕСИМО’2012) 24-28 сентября 2012 г. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД” - 2012. - С. 209-217.
6. Гитис В.Г., Вайншток А.П., Дерендяев А.Б., Методы и средства для геоинформационного анализа данных арктического мониторинга. В книге Научно технические проблемы освоения Арктики (Научная сессия Общего собрания членов РАН 16 декабря 2014 г.) М., Наука, 2015. Стр. 238-260.
7. Гитис В.Г. Геоинформационные технологии для научных исследований // Вестник РФФИ, №2-3 (70-71), апрель-сентябрь 2011, С. 13-32.
8. Gitis, V., Derendyaev, A., Weinstock, A. (2016). Web-based GIS technologies for monitoring and analysis of spatio-temporal processes. *International Journal of Web Information Systems*, 12(1), 102 -124.
9. Dangermond J. Geodesign and GIS-designing our futures //Peer Reviewed Proceedings of Digital Landscape Architecture, Anhalt University of Applied Science, Germany. - 2010.
10. Harder, Christian. *The ArcGIS Book: 10 Big Ideas about Applying Geography to Your World*. Esri Press, 2015.
11. Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Holm, E. V., Isaksen, I., Kallberg, P., Kohler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thepaut, J.-N., Vitart, F. ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656). (2011). 553-597.

12. Абузяров З. К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. - М., ИГ "Социн". - 2009. - 287с.
13. Думанская, И. О. Ледовые условия морей европейской части России // М.: ИГ-СОЦИН 2014.
14. Зацева С.Н., Дианский Н.А., Журавель В.И., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В., Фомин В.В. // Моделирование разливов нефти в море для планирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности при реализации нефтегазовых проектов. Часть 1. Методология// Проблемы Арктики и Антарктики, 2015, 4(106), с. 27 - 39.
15. Зацева С.Н., Дианский Н.А., Журавель В.И., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В., Фомин В.В. // Моделирование разливов нефти в море для планирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности при реализации нефтегазовых проектов. Часть 2. Особенности реализации прикладных задач // Проблемы Арктики и Антарктики, 2015, 1(107), с.5-18.

Technology of monitoring and analysis of the hydrometeorological situation in the Arctic

V.G. Gitis*, A.B. Derendyaev*, K.N. Pertrov*, A.P. Weinstock*, I.O. Dumanskaya***, S.N. Zatsepa**, A.A. Zelenko***, A.A. Ivchenko**, E.S. Nesterov***

* *Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences,*

** *N.N. Zubov's State Oceanographic Institute (Roshydromet),*

*** *Hydrometeorological Centre of Russia*

A new geoinformation technology for monitoring the hydrometeorological situation in the Arctic is being considered. The technology combines two levels of geodata analysis. The first level supports automatic loading and data processing, providing the operator with simple analytic tools with an intuitive interface and visual representation of results available to a wide class of users. The second level is designed for detailed analysis of hypotheses that the expert can formulate at the first level. The monitoring platform has two software applications: (1) climate processes in the Arctic and (2) operational and forecasting environments in the regions of the White and Barents Seas with the possibility of analyzing the environmental threat to vulnerable resources during the extraction and transportation of hydrocarbons.

KEYWORDS: technology of monitoring, analysis of natural and anthropogenic processes, Arctic, GIS, hydrocarbon spill.