

ВОЗДЕЙСТВИЕ ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА ФОРМИРОВАНИЕ И ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

© 2023 А.А. Петрова, О.В. Латышева

*Санкт-Петербургский филиал ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия, 199034;
e-mail: office@izmiran.spb.ru*

Поступила в редакцию 26.03.2023; после доработки 17.07.2023 г.; принята в печать 26.09.2023 г.

В последние десятилетия ускорилось сокращение площади арктических льдов и их толщина. Эти явления связывают с глобальным потеплением климата. Но ледовый покров разрушается не только под влиянием внешних причин, но и под воздействием глубинного флюидодинамического фактора литосферы. Авторами проведен анализ спутниковых наблюдений толщины льда совместно с интерпретацией аномалий геомагнитного поля и поля силы тяжести. Исследования позволили выдвинуть предположение о влиянии термофлюидных каналов разломов на формирование ледяного покрова за счет уменьшения толщины льдов. В работе представлены результаты изучения строения литосферы Северного Ледовитого океана в зонах ускоренного таяния льда и выходов термофлюидных каналов к поверхности дна. Рассмотрен механизм влияния эндогенного фактора на процессы разрушения льда. Отмечено, что характер горизонтальной расслоенности земной коры, возможно, влияет на процесс ледообразования. Учет флюидодинамического фактора и расслоенности земной коры на формирование ледового режима может быть полезен при определении оптимальных транспортно-логистических трасс круглогодичного судоходства по Северному морскому пути и безопасной проводки судов.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, ледяной покров, флюидодинамический фактор.

ВВЕДЕНИЕ

Общее сокращение площади арктического морского льда ускорилось с 2000-х гг. Площадь льдов старше двух лет (многолетних льдов) уменьшилась с 16 % в середине 1980-х гг. до 1.2 % в 2016 г. Спутниковые наблюдения показывают, что протяженность ледяного покрова Арктики сокращается со средней скоростью 4.5 % за десятилетие (Шалина, Бобылев, 2017).

Исследование особенностей разломной системы литосферы Северного Ледовитого океана (СЛО) позволило оценить влияние флюидодинамического фактора на процессы разных стадий сезонного цикла изменения ледяного покрова. Для выявления неоднородностей земной коры и мантии в зонах таяния массивов старого льда (плавучего льда, подвергшегося таянию, по крайней мере, в течение одного лета) выполнен анализ данных спутниковых наблюдений толщины льда совместно с результатами

интерпретации аномалий геомагнитного поля и поля силы тяжести. В результате исследования были установлены специфические особенности глубинного строения литосферы для районов с разными стадиями таяния сплоченного льда и в зонах минимального и максимального положения кромки льда. С целью прогноза зон разрушения льда, обусловленных влиянием термофлюидных каналов, исследовалась природа глубинных факторов локализации зон таяния в массивах старого льда СЛО. На примере районов раннего ледообразования в арктических морях получено представление о влиянии горизонтальной слоистости неоднородностей верхней части земной коры на формирование условий сохранения остаточных однолетних льдов. Рассмотрены перспективы исследований особенностей глубинного флюидодинамического фактора литосферы в районах таяния многолетнего льда и выявление специфики строения горизонтальных неоднородностей земной коры, возможно,

способствующих нарастанию молодых льдов в осенне-зимний период года.

ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ СЛО В ЗОНАХ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Наиболее характерной чертой развития ледяного покрова СЛО в XXI в. является устойчивая тенденция к сокращению площади льдов в Арктическом бассейне в зимний и летний периоды. Сокращение многолетнего льда и все усиливающееся преобладание относительно тонких однолетних льдов является одним из самых значительных изменений, произошедших в Арктике за последние десятилетия (Миронов и др., 2021; Репина и др., 2019; Юлин и др., 2019). Эти явления связываются с глобальным потеплением, но на самом деле ледяной покров размывается не только с поверхности, но и из глубин Земли. Изменения площади и состояния льдов СЛО отражаются на ледовых условиях арктических морей Северного морского пути (СМП) (Егоров, 2021; Миронов и др., 2021; Юлин и др., 2019). В настоящей работе использованы термины и понятия ледовых образований, принятые в Атласе ледяных образований (Атлас..., 2019).

Анализ результатов спутникового мониторинга состояния ледяного покрова позволяет существенно пополнить, уточнить и детализировать наши знания о закономерностях формирования ледяного покрова СЛО.

Годовые и сезонные изменения ледяного покрова в период с 2007 по 2022 гг. позволили рассмотреть эффекты эндогенного фактора на стадии формирования ледяного покрова с появлением снежниц и в процессе разрушения льда с образованием трещин, проталин и разводий, нарушающих сплошность льдин (Копытенко и др., 2020; Петрова и др., 2022; Petrova et al., 2022). Проведенные авторами исследования в настоящей работе подтвердили, что флюидодинамический фактор влияет на процессы разрушения дрейфующего льда СЛО.

Геотермальные потоки глубинных флюидов поднимаются из мантии по флюидоподводящим каналам земной коры (Летников, 2015; Павленкова, 2013). Флюид — химически агрессивное вещество в виде потока легких летучих химически активных соединений, находящихся в конденсированном состоянии. Потоки глубинных флюидов перемещаются из флюидонасыщенных слоев земной коры и мантии к поверхности по флюидоподводящим каналам.

Исследования глубинного строения литосферы СЛО в зонах ускоренного таяния льда проведены на основе интерпретации аномалий модуля и компонент магнитного поля Земли

(МПЗ), аномалий силы тяжести в редукции Фая (аномалии в свободном воздухе на поверхности эллипсоида WGS-84) (Bonvalot et al., 2012) и сейсмологических данных (International..., 2016). На глубинных геофизических разрезах авторами представлены особенности земной коры в виде разломных зон, термофлюидных каналов и флюидонасыщенных слоев. Плотностные и магнитные разрезы получены методом спектрально-пространственного анализа аномалий магнитного поля и силы тяжести с конвертацией спектрально-пространственного представления полей в глубинные разрезы (Петрова, Копытенко, 2019). Плотностные разрезы построены по аномалиям силы тяжести, магнитные — по аномалиям модуля и горизонтальной компоненты МПЗ, рассчитанным по модели Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН) (Копытенко, Петрова, 2020; Петрова, 2015).

На плотностных и магнитных разрезах прослеживаются каналы термофлюидной проработки и линзы флюидных слоев в виде зон пониженных плотности и намагниченности в земной коре и в мантии (Petrova et al., 2022a). Максимальный эффект воздействия теплового потока зафиксирован при восходящей миграции флюидов по вертикальным разломам (рис. 1).

Анализ магнитных и плотностных разрезов литосферы позволил выявить местоположение термофлюидных каналов и линз флюидных слоев в Арктическом бассейне.

Результаты интерпретации аномалий МПЗ, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных позволили уточнить представление о специфических особенностях глубинного строения литосферы СЛО, которые могли бы стимулировать локальные разрушения льда (Петрова и др., 2020, 2020a, 2022). В процессе исследования выявлено местоположение флюидных слоев и путей каналов термофлюидной проработки. Термофлюидные каналы и флюидонасыщенные слои земной коры и мантии визуализируются на глубинных плотностных и магнитных разрезах в виде субвертикальных и латеральных зон пониженной плотности и намагниченности. Траектории термофлюидных каналов в земной коре и мантии вблизи границ зон различной сплоченности зимних льдов приведены на плотностных и магнитных разрезах моря Лаптевых (рис. 1).

Субвертикальный разлом, выходящий из мантии с глубины более 60 км, хорошо выражен на плотностном разрезе Чукотского моря (рис. 2). Зоны влияния потоков глубинных флюидов

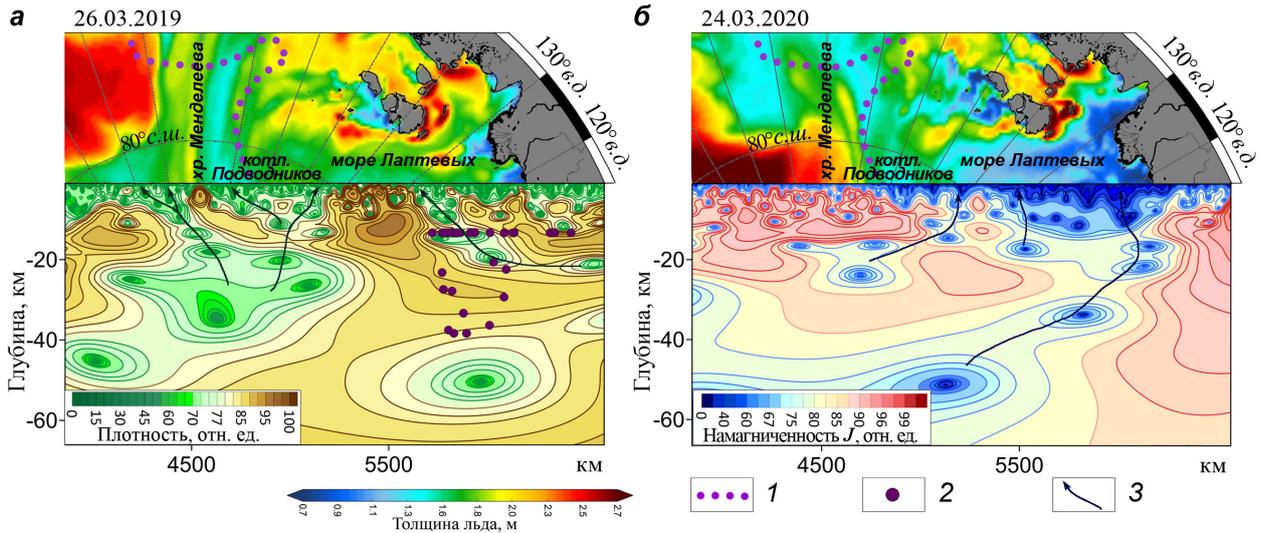


Рис. 1. Каналы термофлюидной проработки земной коры моря Лаптевых: *a* — на плотностном разрезе (ледяной покров 2019 г. (Mercator..., 2020)); *б* — на магнитном разрезе (ледяной покров 2020 г. (Mercator..., 2020)): 1 — северная граница СМП; 2 — очаги землетрясений (ISC <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>); 3 — зоны каналов термофлюидной проработки. Положение разрезов представлено на рис. 3.

Fig. 1. Channels of thermofluid processing of the Earth's crust in the Laptev Sea: *a* — in the density section (ice cover in 2019 (Mercator ..., 2020)); *б* — on the magnetic section (ice cover in 2020 (Mercator..., 2020)): 1 — northern boundary of the NSR; 2 — earthquake sources (ISC <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>); 3 — zones of channels of thermofluid processing. the location of the sections. The position of the cuts is shown in fig. 3.

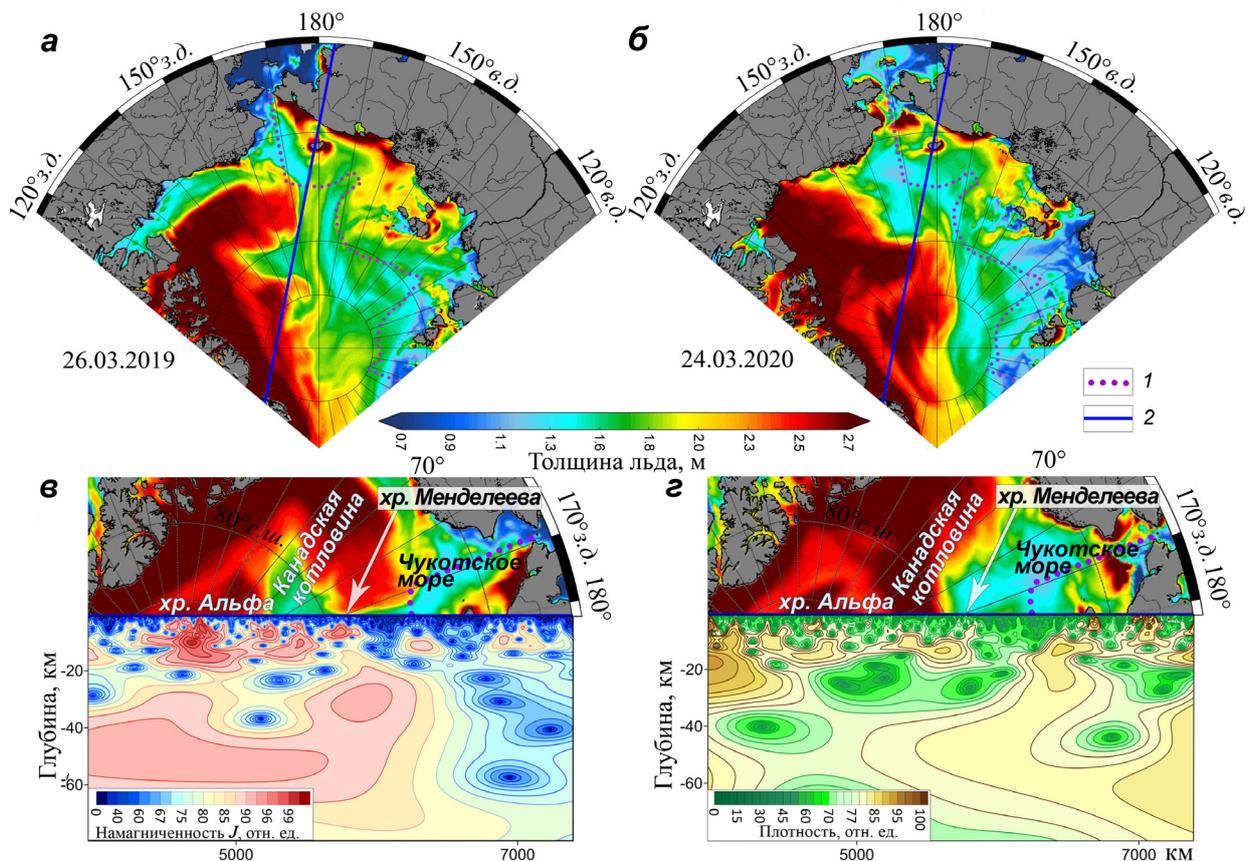


Рис. 2. Разрезы земной коры Чукотского моря: Ледяной покров 2019 г. (Mercator Ocean..., 2020) (*a*); ледяной покров 2020 г. (Mercator..., 2020) (*б*). Термофлюидные каналы: на магнитном (*в*) и плотностном (*з*) разрезах. 1 — северная граница СМП; 2 — положение разрезов.

Fig. 2. Sections of the earth's crust in the Chukchi Sea. Ice cover 2019 (Mercator..., 2020) (*a*); 2020 ice cover (Mercator..., 2020) (*б*). Thermofluid channels: on the magnetic (*в*) and on the density (*з*) sections. 1 — northern boundary of the NSR; 2 — the location of the sections.

заметны по изменениям толщины зимних ледяных покровов 2019 и 2020 гг. (Mercator..., 2020).

Совместный анализ данных спутникового мониторинга ледовых разрушений СЛО за период 2007–2022 гг. и положений термофлюидных каналов показал, что гидротермальные потоки глубинных флюидов, поднимаясь к поверхности морского дна, возможно, оказывают влияние на процессы формирования зон пониженной толщины льда в зимний период и разрушения льда в летний период (Петрова и др., 2020, 2020а, 2022).

Для изучения неоднородностей литосферы выполнены расчеты протяженных глубинных разрезов, пересекающих основные структуры СЛО. Интерпретация проведена по аномалиям МПЗ и аномалиям поля силы тяжести методом спектрально-пространственного анализа с конвертацией в глубинные разрезы (Петрова, Копытенко, 2019). Магнитные разрезы вычислены по аномалиям модуля (T), вертикальной (Z) и горизонтальной (H) компонентам МПЗ, полученным на основе векторной модели (Копытенко, Петрова, 2019). Векторная модель Арктики верифицирована вблизи поверхности Земли по данным геомагнитных обсерваторий Мировой сети и на высотах полета спутников ($h = 400$ км и 450 км) по векторным измерениям магнитных аномалий космическими аппаратами (КА) CHAMP и Swarm (рис. 3) (Petrova et al., 2022b; Thebault et al., 2016).

Идентификация физических параметров геологических образований на плотностных разрезах, построенных по аномалиям силы тяжести, верифицирована по сейсмическим скоростным разрезам акватории СЛО (Петрова и др., 2020а; Oakey, Saltus, 2016; Petrov et al., 2016) и сейсмологическим данным (ISC <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>).

В результате выполненных работ установлено, что очаги землетрясений, тяготея к кон-

тактам пород разной плотности, вертикальным разломным зонам и латеральным границам выявляют разломно-блоковую структуру неоднородностей земной коры. На плотностных разрезах гипоцентры землетрясений подчеркивают расслоенность земной коры, дают возможность оценить глубину контактов слоев разной плотности и поверхностей возможного скольжения блоков (например, террейнов). В результате сейсмических событий на границах разных блоков земной коры при их взаимном смещении происходит генерирование деформационных волн различного типа (Быков, 2018; Гарагаш, Лобковский, 2021), которые могут являться триггерным механизмом пульсаций флюида в ослабленных слоях и активизации тепловых потоков глубинных флюидов.

Построенные магнитные и плотностные разрезы позволили оценить глубину залегания, форму и намагниченность магнитоактивных образований земной коры СЛО, определить положение флюидонасыщенных слоев и траектории перемещения потоков флюидов по каналам термофлюидной проработки. Магнитные разрезы, построенные по аномалиям компонент МПЗ, помогают определить характер намагниченности горизонтов разного возраста, что имеет существенное значение для изучения глубинного строения земной коры СЛО (Петрова и др., 2020а, 2022).

ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫЕ СЛОИ И КАНАЛЫ ТЕРМОФЛЮИДНОЙ ПРОРАБОТКИ В ЛИТОСФЕРЕ СЛО

В земной коре и верхней мантии сейсмическими исследованиями были выделены и подтверждены электромагнитными работами ослабленные флюидонасыщенные слои. Созданию флюидопроводящих систем способствует

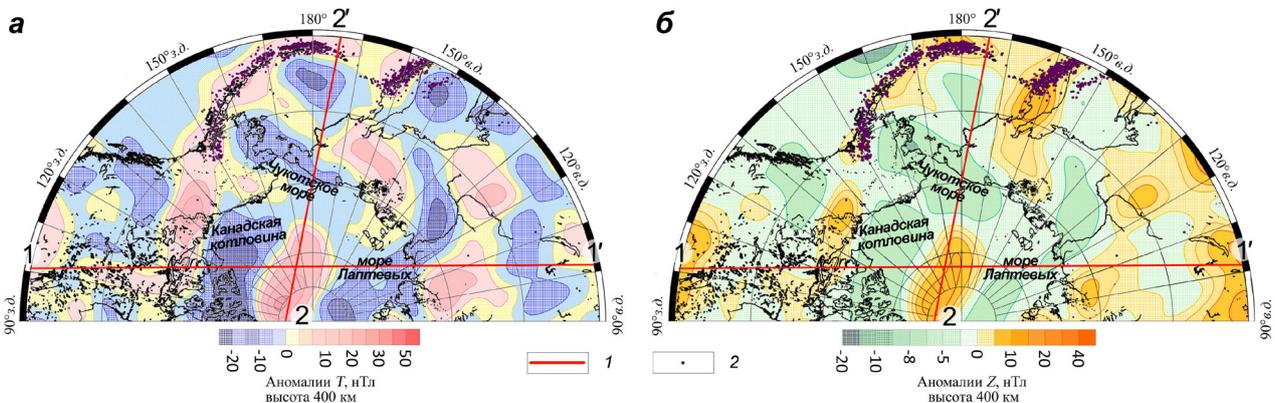


Рис. 3. Аномалии модуля T (а); аномалии вертикальной компоненты Z МПЗ, измеренные КА CHAMP (Thebault et al., 2018) (б): 1 — положение разрезов (1-1' — рис. 1, 2-2' — рис. 2); 2 — землетрясения, глубина очага ≥ 40 км, $M \geq 5$.

Fig. 3. Anomalies of module T (a); — anomalies of the vertical Z -component measured by the CHAMP spacecraft (Thebault et al., 2018) (б): 1 — the position of sections (1 — fig. 1, 2 — fig. 2); 2 — earthquakes focal depth ≥ 40 km, $M \geq 5$.

процесс расланцевания земной коры (Павленкова, 2013; Simmons et al., 2010).

На основании глубинных сейсмических исследований флюидонасыщенные слои выявлены в виде прослоек с пониженными значениями скоростей сейсмических волн, пониженной плотностью и повышенной электропроводностью. Протяженность ослабленных слоев составляет от нескольких сотен километров в земной коре и до нескольких тысяч в верхней мантии (Павленкова, 2013; Simmons et al., 2010). Ослабленные зоны представляют собой трещиноватые флюидонасыщенные среды, которые связывают с процессами динамотермального метаморфизма пород и играют важную роль в процессе транспорта флюида к поверхности (Павленкова, 2003).

Исследование плотностных и магнитных свойств ослабленных слоев с пониженными значениями скоростей сейсмических волн показало, что они визуализируются на петрофизических разрезах в виде зон пониженной плотности и намагниченности. Поток флюидов из линз флюидонасыщенных слоев земной коры поднимается к поверхности по каналам термофлюидной проработки (рис. 1, 2). Более глубоко расположенные мощные зоны флюидизации мантии подпитывают флюидные системы земной коры (Летников, 2015; Павленкова, 2013). Ослабленные слои зон пониженных сейсмических скоростей земной коры на глубине 10–20 км могут иметь температуру около 150 °С (Павленкова, 2003). Линзы флюидонасыщенных слоев, подпитывающих канал, выходящий из низов земной коры, по данным работы (Данилова, Шумилова, 2015) находятся при температуре 450–580 °С. Высокотемпературные флюидные системы верхней мантии, находящиеся в вязком состоянии, достигают значений $T > 950\text{--}1300$ °С (Летников, 2015; Павленкова, 2013; Artemieva, 2005). По сейсмическим данным воздействие флюидных глубинных систем с глубины от 10–30 км до 100 км локализовано в зонах глубинных разломов, дренирующих мантию ниже поверхности Мохо (Павленкова, 2003).

На процессы разрушения дрейфующего льда влияет увеличение температуры и мощности флюидного потока. Возможность образования зон развоидий и сквозных проталин возникает при увеличении тепла флюидного потока до значений более 100 мВт/м² (Yakushev et al., 2018).

В северной полярной шапке пространственное расположение ослабленных слоев флюидных систем зафиксировано измерениями спутников CHAMP и Swarm на высотах 400–450 км в виде отрицательных аномалий модуля и вертикальной Z-компоненты МПЗ (Thebault et al., 2018). Примеры проявления флюидной системы в море

Лаптевых и Чукотском море в отрицательных аномалиях модуля T и Z -компоненты МПЗ демонстрируются по измерениям миссии КА CHAMP (рис. 3) (Петрова и др. 2022; Petrova et al., 2022b; Thebault et al., 2018).

Глубинные разломы являются универсальными флюидопроводниками геологической системы периодического действия (Летников, 2015). Тектонические деформационные волны, возникающие в литосфере в результате сейсмических событий, вызывают пульсации в линзах флюидизированных слоев, что может являться одной из причин активизации флюидодинамических процессов в термофлюидных каналах разломных зон земной коры (Быков, 2018). В работе (Гарагаш, Лобковский, 2021) сделано предположение, что тектонические волны в литосфере СЛО, вызванные землетрясениями в Алеутской зоне субдукции (рис. 3), могли распространиться до области арктического шельфа, что в настоящее время приводит к активизации эмиссии метана и наступлению резких фаз потепления современного климата в Арктике.

Комплексная интерпретация плотностных и магнитных разрезов СЛО проводилась с учетом глубины залегания поверхности Кюри (изотерма 550 °С для магнетита), температуры перехода пород в вязкое состояние (изотерма 1300 °С) (Artemieva, 2005). В настоящей работе в акватории СЛО авторами так же учитывались распределения гипоцентров землетрясений (ISC <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>), глобальная модель мантийной плотности и сейсмических скоростей (Simmons et al., 2010; Петрова и др. 2022). Полученный результат позволил уточнить представление о характере распределения плотностных и магнитных горизонтальных и вертикальных неоднородностей в литосфере Арктики до глубины ~100 км.

РОЛЬ ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКОГО ФАКТОРА В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

Спутниковые наблюдения в СЛО дают возможность оценивать состояние ледяного покрова, отслеживать динамику границ между льдами различной сплоченности, межгодовую и сезонную трансформацию ареалов протаивания многолетнего морского льда (Егоров, 2021; Копытенко и др., 2020; Миронов и др., 2021; Репина, Тихонов, 2018; Центр «Север»..., 2022; Шалина, Бобылев, 2017; Mercator..., 2020). Выявление пространственного распределения выходов термофлюидных каналов в СЛО может позволить локализовать зоны изменчивости толщины многолетнего льда и динамику границ разновозрастных льдов. Для оценки

зависимости степени эволюции дрейфующего льда от глубины заложения разломов авторами настоящей работы проводится отслеживание и анализ ареалов таяния, приуроченных к выходам потоков флюидов к поверхности морского дна.

Полученные данные позволяют исследовать механизм возникновения природных явлений глубинного флюидодинамического фактора и устанавливать их возможное влияние на процессы, изменяющие состояние ледяного покрова: формирование зон с пониженной толщиной льда в зимний период и таяния льда в летний период.

Комплексная интерпретация спутникового мониторинга эволюции толщины ледяного покрова и геофизических данных на основе аномалий МПЗ, аномалий силы тяжести, сейсмических и сейсмологических данных позволяет установить районы выходов флюидных потоков из глубинных разломных зон к трассам плавания судов по СМП.

Совместный анализ спутниковых наблюдений за изменениями льда с учетом положений термофлюидных каналов на глубинных разрезах может обеспечить выявление районов проявления природных явлений эндогенного характера, обусловленных влиянием глубинных термальных потоков земной коры и мантии. Мониторинг ледовой обстановки с учетом выделенных зон глубинных термальных потоков представляет интерес для морских транспортных коридоров круглогодичного судоходства.

На основе анализа результатов спутникового мониторинга ледовых условий авторами настоящей работы высказано предположение, что флюидоподводящие каналы влияют на формирование зимних и летних ледовых условий.

Анализ сезонных изменений толщины многолетнего льда в период с 2007 по 2022 гг. выявил роль разломных зон глубинного заложения на разные стадии таяния льда. Визуализация траекторий флюидоподводящих каналов на магнитных и плотностных разрезах в зонах летнего разрушения ледяного покрова показывает, что глубинный тепловой поток влияет на толщину льда (рис. 4).

Температура термофлюидных потоков зависит от глубины залегания подпитывающих флюидных систем. Максимальный эффект таяния льда ожидается под действием тепловых потоков вертикальных разломов земной коры при восходящей миграции флюидов из глубин мантии. Вертикальный разлом, прослеживающийся с 40 км, представленный в котловине Подводников на плотностных разрезах 3-3' и 4-4',

создает условия для уменьшения толщины и сплоченности льда (рис. 4б, 4д). Термальные субвертикальные потоки из мантии в Чукотском море (рис. 2, 3) способствуют разрушению льда.

Активизация флюидодинамических факторов приводит к увеличению площади снежниц, скорости их протаивания и разрушению льда. Крупная снежница на многолетнем льду (Репина, Тихонов, 2018; Тихонов и др., 2016) в районе хребта Альфа (рис. 4, профиль 3-3') проходит над восходящим потоком мантии с глубины более 30 км. Магнитные разрезы земной коры, построенные по аномалиям Н-компоненты МПЗ (рис. 4е) и аномалиям модуля МПЗ (рис. 4е) подчеркивают характер намагниченности разновозрастных горизонтов Арктического бассейна.

Снежницы и сквозные проталины глубинного происхождения создают негативные последствия в виде ускорения процессов таяния и уменьшения сплоченности разновозрастных льдов СЛО (рис. 4). Дрейфующие льды со снежницами, как было установлено в работе (Репина, Тихонов, 2018), тают в 2–3 раза быстрее. Количество снежниц служит одним из индикаторов изменчивости состояния морского льда. В результате этих процессов за последние десятилетия произошло уменьшение объема льда в Арктике, что привело к усилению дрейфа ледяного покрова СЛО (Егоров, 2021; Репина, Тихонов, 2018; Тихонов и др., 2016; Шалина, Бобылев, 2017; Юлин и др., 2019).

По результатам совместного анализа толщины дрейфующих льдов Арктики в период 2007–2022 гг. с распределением выходов термофлюидных каналов обнаружено, что в процессе таяния льда с образованием разводий, снежниц и проталин вертикальные каналы разломных зон глубинного заложения играют существенную роль. Вертикальные каналы вносят дополнительный вклад в механизм локализации снежниц на многолетних льдах, а также на степень разрушения льда на стадии таяния в летний период.

Таким образом, проведенное в работе исследование показало, что в прогноз локализации ускоренного таяния и разрушения ледяного покрова целесообразно включить изучение траекторий термофлюидных каналов по глубинным петрофизическим разрезам и расположения линз флюидных систем. Определение местоположения ареалов выходов термофлюидных каналов к поверхности морского дна дает возможность выделять районы влияния флюидодинамического фактора земной коры и мантии на многолетний и однолетний ледяной покров.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКОГО ФАКТОРА

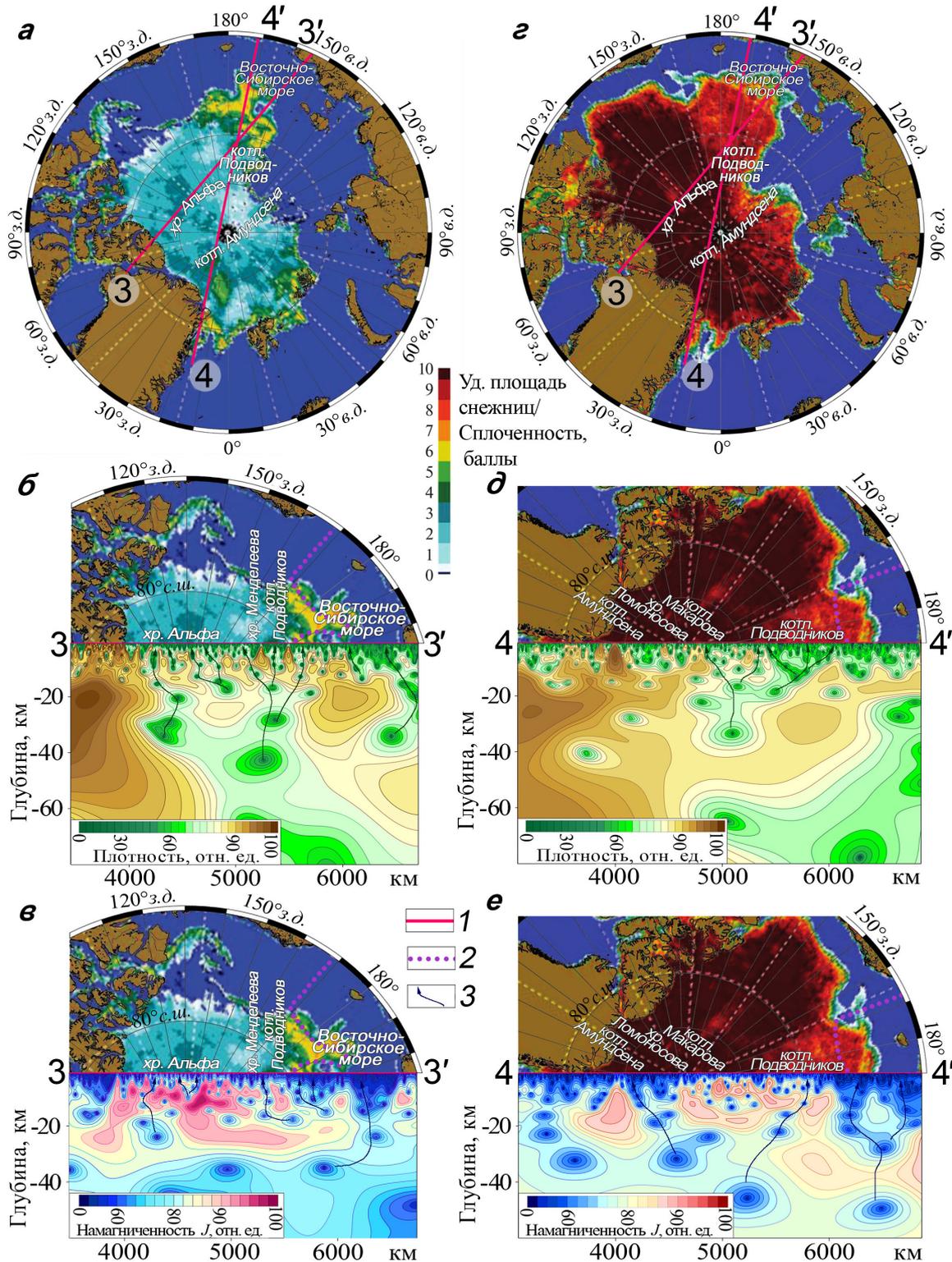


Рис. 4. Выходы термофлюидных каналов к снежникам осеннего ледяного покрова (сентябрь 2014 г.) СЛО (а) и к районам пониженной сплоченности льда (август 2014 г.) (Репина, Тихонов, 2018, Тихонов и др., 2016) (е). Каналы термофлюидной проработки земной коры на плотностных разрезах (б, д); на магнитном разрезе по аномалиям Н-компоненты МПЗ (в); на магнитном разрезе по аномалиям модуля МПЗ (е). 1 — местоположение разрезов; 2 — северная граница СМП; 3 — зоны каналов термофлюидной проработки.

Fig. 4. The outlets of thermofluid channels to the snowfields of the autumn ice cover (September 2014) of the Arctic Ocean (a) and to areas of reduced ice concentration (August 2014) (Repina and Tikhonov, 2018, Tikhonov et al., 2016) (e). Channels of thermofluid processing of the earth's crust — on density sections (b, d); on the magnetic section along the anomalies of the H-component of the EMF (v); on the magnetic section along the anomalies of the EMF module (e). 1 — location of sections; 2 — northern boundary of the NSR; 3 — zones of channels of thermofluid processing.

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗОН ПРОТАИВАНИЯ ЭНДОГЕННОГО ХАРАКТЕРА В АКВАТОРИИ СМП

Сложная поверхностная структура морского льда обусловлена особенностями ледообразования (нарастания и таяния льдов) и характером дрейфа ледяных полей. Поверхностные неоднородности в виде торосов, разводий и снежниц играют важную роль как во взаимодействии с приводным слоем атмосферы, так и в термическом режиме поверхности. Ледовый режим — это совокупность закономерно повторяющихся процессов образования, развития и разрушения ледяного покрова водных объектов.

Методика краткосрочного прогноза типов ледовых условий, разработанная в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ), основана на двух базовых элементах (Миронов и др., 2021):

- цифровой модели эволюции ледяного покрова в арктических морях;
- системе критериев для определения типа ледовых условий.

Рассчитываемые значения параметров ледяного покрова: для зимнего периода — количество льдов различного возраста, для летнего периода — площадь сплоченных льдов и ледовитость. Установленные критерии позволяют оценить текущий тип ледовых условий и прогнозный тип ледовых условий в ближайшие 1–5 суток.

Типы ледовых условий оперативно меняются в зависимости от ожидаемых ледовых условий в морях. По установленным типам дается разрешение для плавания судов различных ледовых классов (рис. 5) (Миронов и др., 2021).

Спутниковый мониторинг ледовых условий в течение последнего десятилетия позволил оценить роль флюидодинамического эндогенного фактора на формирование ледового режима (Петрова и др., 2020, 2020а, 2022). Флюидные слои представляют собой ослабленные латеральные зоны пониженных сейсмических скоростей, пониженной плотности, повышенной электропроводности и слабой намагнитченности (Летников, 2015; Павленкова, 2013). Исследования, проведенные на основе визуализации плотностных и магнитных неоднородностей на глубинных разрезах, секущих зоны ускоренного таяния, подтвердили, что основной вклад в разрушение ледяного покрова вносят вертикальные и субвертикальные термофлюидные каналы, выходящие из линз флюидных слоев земной коры и мантии с глубины более 20 км.

Изучение особенностей глубинного строения земной коры СЛО дало возможность выявить пространственное расположение флюидных систем земной коры и мантии. К зонам разрушений ледяного покрова подходят пути миграции термальных потоков флюидов, выделяющихся на плотностных и магнитных разрезах в виде сквозных и ветвистых трещин, секущих слои земной коры (рис. 1, 2, 4).

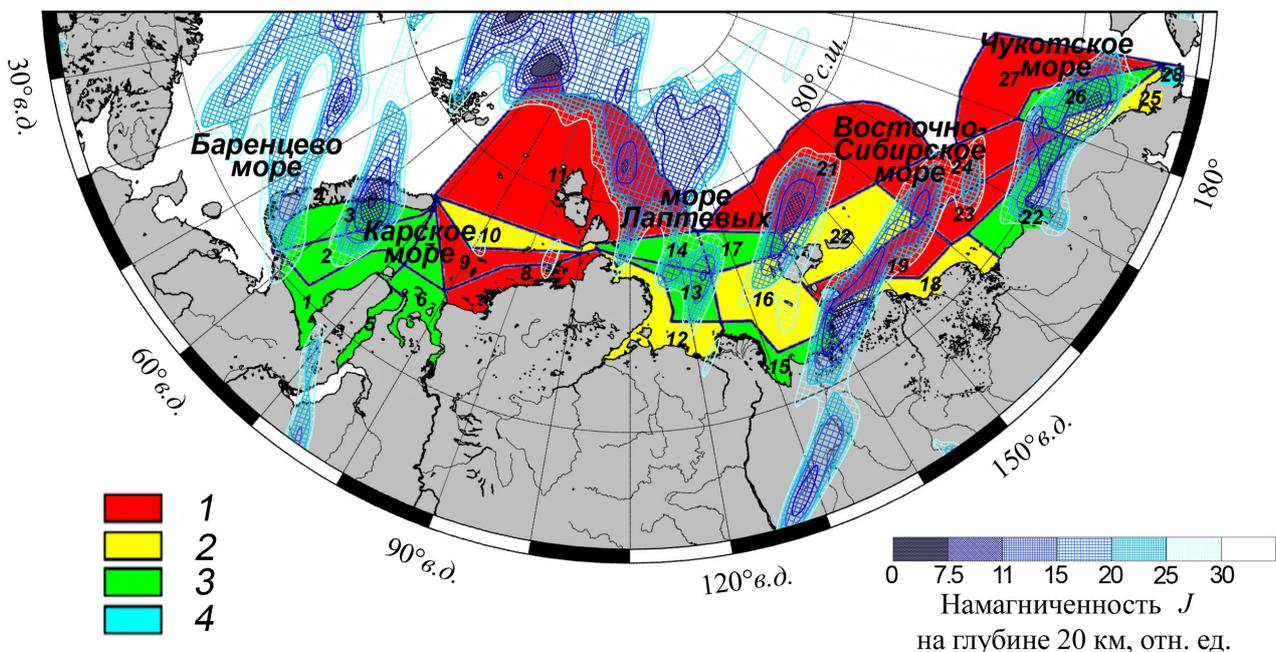


Рис. 5. Расположение наиболее вероятных зон протаивания эндогенного характера и прогноз типов ледовых условий на период 06.07.2021–09.07.2021 гг. (Миронов и др., 2021). Типы ледовых условий: 1 — тяжелый; 2 — средний; 3 — легкий; 4 — чистая вода.

Fig. 5. Location of the most probable endogenous thawing zones and forecast of types of ice conditions for the period 07.06.2021–07.09.2021 (Mironov et al., 2021). Types of ice conditions: 1 — heavy; 2 — medium; 3 — light; 4 — pure water.

Для оценки влияния флюидодинамического фактора на появление локальных зон интенсивного таяния многолетнего льда и формирование кромки дрейфующего льда по магнитным данным построена площадная схема пространственного распределения минимумов намагниченности на уровне глубины ~20 км, отражающая расположения флюидонасыщенных слоев в земной коре СЛО (рис. 5). В процессе работы в акватории Арктики было отмечено, что выходы вертикальных термофлюидных каналов из линз флюидной системы земной коры к поверхности морского дна приурочены к ареалам минимумов магнитных свойств.

Ранее были исследованы плотностные свойства земной коры СЛО на глубинах ≥ 20 км (Петрова, и др., 2020). Анализ глубинных разрезов показал, что в земной коре флюидные слои выделяются в виде линз пониженной намагниченности и плотности на глубинах ≥ 20 км. Разломные зоны, находясь под направленным воздействием потока флюидов из средней части земной коры, стимулируют таяние льда в зонах выхода к поверхности, что определяет распределение наиболее вероятных районов разрушения ледового покрова.

Зоны выходов термофлюидных каналов к поверхности дна приурочены к ареалам минимумов магнитных и плотностных свойств, создаваемых линзами флюидных систем земной коры. Построенная авторами схема распределения минимумов намагниченности в земной коре выявляет ареалы выходов каналов и прогнозирует наиболее вероятные районы зон ускоренного разрушения льда под направленным влиянием глубинного флюидодинамического фактора.

Совмещение схемы ареалов протаивания глубинного происхождения со схемой прогноза типов ледовых условий в акватории СМП (Миронов и др., 2021) позволяет выделять зоны, находящиеся под дополнительным влиянием глубинных восходящих гидротермальных потоков литосферы (рис. 5).

Используемые в ААНИИ критерии прогноза определения типов ледовых условий в целом адекватно отражают диапазон изменчивости ключевых параметров ледяного покрова, оказывающих наибольшее воздействие на судоходство. Однако в этих критериях не учитывается влияние глубинных факторов нарушения сплошности льдов, имеющих большое значение для судоходства.

Модель эволюции ледяного покрова ААНИИ даёт средние арифметические ошибки краткосрочного и долгосрочного прогнозов ключевых критериев определения типа ледовых условий в выделенных районах. Например, в Чукотском

море из четырёх разработанных долгосрочных прогнозов оправдался один, три прогноза не оправдались. Средняя оправдываемость прогнозов составила 25 %. В Карском море оправдываемость долгосрочных прогнозов составила 67 %. При этом значительные ошибки прогноза ААНИИ объясняются недоучетом локальных атмосферных процессов (Миронов и др., 2021).

Вместе с тем, легкий тип ледовых условий, показанный на схеме прогнозов зеленым цветом (рис. 5), в западной части Карского моря, в море Лаптевых и Чукотском море приходится на выходы термальных потоков из земной коры с глубины ≥ 20 км, где температура может достигать 450–580 °С (Данилова, Шумилова, 2015; Павленкова, 2003). Это позволяет предположить, что именно недоучет глубинного флюидодинамического фактора на формирование прогнозов ледовых условий увеличивает величину ошибки оправдываемости ледовых прогнозов.

Еще значительней может быть влияние глубинных зон флюидонасыщенных слоев верхней мантии, выявленных КА CHAMP и КА Swarm (рис. 3, 6). Сопоставление схемы типов ледовых условий с положением мантийных флюидных систем показало, что в западной части Карского моря, в море Лаптевых и Чукотском море легкий тип ледовых условий приходится на местоположение линз флюидных систем верхней мантии, имеющих по модельным расчетам $T > 950\text{--}1300$ °С (Летников, 2015; Павленкова, 2013; Artemieva, 2005). Поэтому потоки флюидов из мантийных флюидных систем могут быть теплее, чем термальные потоки, выходящие из земной коры.

Включение глубинных параметров разрушения ледяного покрова арктических морей в систему критериев определения типа ледовых условий помогло бы улучшить качество прогнозов, что является весьма актуальной задачей.

В результате проведенного исследования в СЛО определены наиболее вероятные районы возникновения природных явлений эндогенного характера. В случае, если выход термофлюидного канала происходит в зоне развития газогидратов, помимо ускоренного таяния льда, возникает высокая вероятность взрывоопасных явлений, обусловленных выбросом древнего метана из подводной мерзлоты (Богоявленский и др., 2019; Петрова, и др., 2020; Попков и др., 2012; Andreassen et al., 2017, 2020; Bogoyavlenskiy et al., 2019; Petrova et al., 2022a; Shakhova et al., 2019). Схемы расположения флюидных слоев, проявляющихся на глубинах более 20 км, в виде линз пониженной плотности и намагниченности, определяют распределение наиболее опасных зон глубинного происхождения. На основе схемы вероятных зон протаивания эндогенного характера и схемы газогидратоносности

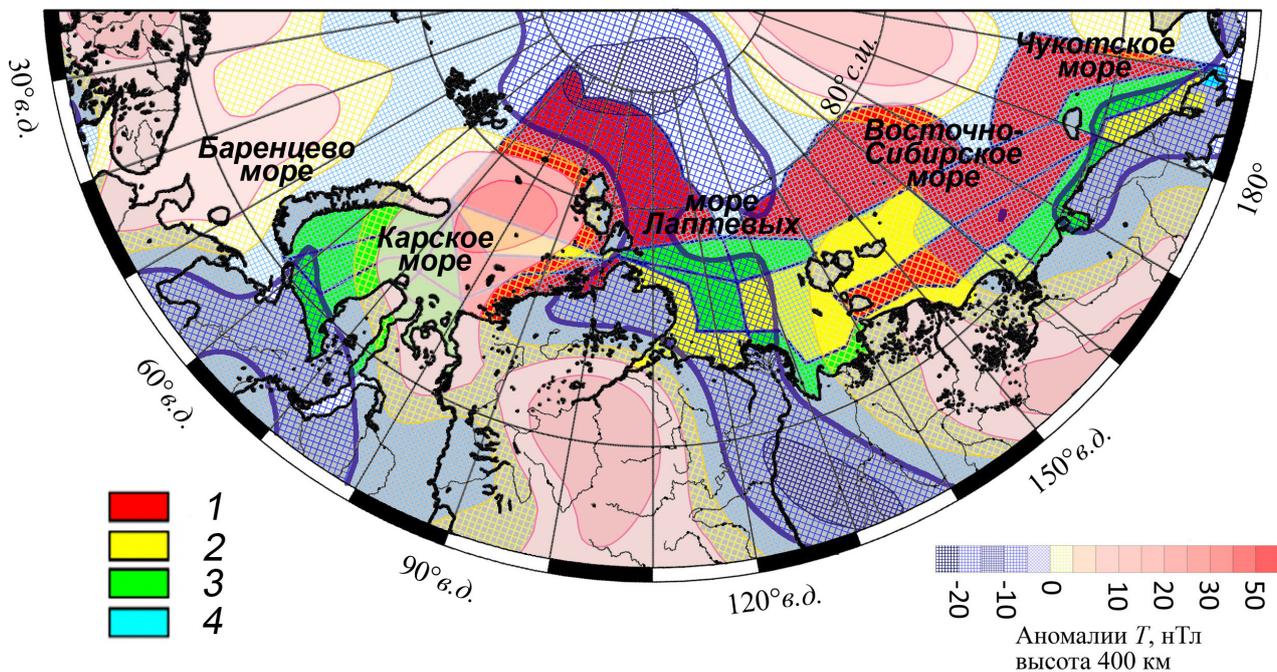


Рис. 6. Схема районирования долгосрочных прогнозов ААНИИ (Миронов и др., 2021) на фоне расположения наиболее вероятных зон протаивания эндогенного характера из глубин мантии. Типы ледовых условий: 1 — тяжелый; 2 — средний; 3 — легкий; 4 — чистая вода.

Fig. 6. Scheme of zoning of long-term forecasts of the AARI (Mironov et al., 2021) against the background of the location of the most probable zones of endogenous thawing from the depths of the mantle. Types of ice conditions: 1 — heavy; 2 — medium; 3 — light; 4 — pure water.

возможна оценка размещения взрывоопасных зон природных явлений эндогенного характера в акватории Арктического бассейна.

Таяние полярных льдов — сложный многоплановый процесс, требующий дальнейшего изучения с учетом выявленного влияния флюидодинамического фактора. Это позволит предсказывать районы с более интенсивным процессом таяния.

Для уменьшения рисков мореплавания по результатам комплексной интерпретации магнитных аномалий, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных исследованы районы выявления выходов флюидовыводящих разломов глубинного заложения вдоль трасс СМП. По мнению авторов, при составлении долгосрочных прогностических моделей эволюции ледяного покрова, помимо внешних факторов, целесообразно учитывать дополнительный вклад, привносимый в процесс разрушения льда глубинным флюидодинамическим фактором, особенно в зонах развития газогидратов.

СПЕЦИФИКА СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЗОНАХ СТАБИЛЬНОГО МНОГОЛЕТНЕГО ЛЬДА И В РАЙОНАХ ОСТАТОЧНЫХ ЛЬДОВ

Идентификация физических параметров геологических образований на плотностных разрезах, верифицированная по сейсмологическим

данным и сейсмическим скоростным разрезам в акватории СЛО, показала хорошую сходимость результатов. На основе интерпретации аномалий модуля и компонент МПЗ, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных получена модель глубинного строения литосферы СЛО в районах ускоренного разрушения льда.

Однако для процесса круглогодичного судоходства важен прогноз не только зон ускоренного разрушения льда. На безопасность судоходства существенное влияние оказывает также аномально раннее ледообразование в осенний период, которое создает быстрое накопление льдов (Миронов и др., 2021; Юлин, Шаратунова, 2018). Начало раннего устойчивого ледообразования и наличие скоплений остаточных льдов ухудшает условия осеннего мореплавания и способствует возникновению сжатий судов даже в однолетних льдах.

Проведенные в настоящей работе исследования показали, что с большой вероятностью на формирование условий сохранения остаточных льдов влияет характер горизонтальной слоистости верхней части земной коры. Например, в районе повышенной ледовитости моря Лаптевых выявлены горизонтальные слои на глубинах 5–12 км (рис. 1). Возможно, что это проявились покрывки флюидопоров, которые частично перекрывают потоки глубинного тепла и тем самым создают условия для сохранения остаточных льдов.

В районах развития крупных массивов многолетних льдов на глубинных разрезах в верхней части земной коры наблюдаются мощные плотные и магнитные горизонты в интервале глубин от 5 до 20 км и более. В зоне массивов льдов хребта Менделеева такие горизонты видны на магнитном разрезе СЛО (рис. 1б), на магнитном и плотностном разрезах (рис. 2в-г), на плотностном разрезе в области повышенной сплоченности льда (рис. 4д). Возможно, что они отчасти перекрывают тепло мантии и обеспечивают большую устойчивость массивов многолетних остаточных льдов.

Дальнейшее детальное изучение особенностей горизонтальной слоистости верхней части земной коры позволит, по нашему мнению, выявлять районы, которые с большой вероятностью могут характеризоваться ледяными массивами со льдами повышенной сплоченности, ранним осенним ледообразованием и скоплением однолетних остаточных льдов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таяние полярных льдов — сложный многоплановый процесс, требующий дальнейшего изучения с учетом выявленного влияния глубинного флюидодинамического фактора.

В настоящей работе проведено исследование строения литосферы СЛО. На основе совместной интерпретации спутниковых наблюдений толщины льда, аномалий МПЗ, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных выяснено, что литосфера в зонах ускоренного таяния льда имеет специфическое строение.

Визуализация плотностных и магнитных неоднородностей на глубинных разрезах создала основу для формирования представлений о специфике литосферы СЛО в виде флюидных слоев и термофлюидных каналов, влияющих на процессы ледообразования. Магнитные и плотностные разрезы позволили определить траектории перемещения тепловых потоков из линз флюидных слоев земной коры и мантии. Проведена оценка местоположения глубокофокусных линз флюидных систем и траекторий термофлюидных каналов, приуроченных к зонам с пониженной толщиной льда в зимний период, увеличивающих скорость таяния льда в летний период.

На основе интерпретации аномалий модуля и компонент МПЗ, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных получена модель глубинного строения литосферы СЛО в зонах ускоренного разрушения льда и районах сохранения остаточных льдов.

Проведенные исследования подтвердили, что флюидодинамический фактор воздействует на процессы разрушения дрейфующего льда

СЛО. На примере построенных петрофизических разрезов литосферы арктических морей показано, что наиболее существенное влияние на формирование зон с пониженной толщиной льда оказывают потоки флюидов, поднимающиеся из линз флюидной системы земной коры и мантии к поверхности морского дна по траекториям, близким к вертикальным.

Выходы каналов прогнозируют районы зон разрушения льда под направленным действием термальных потоков флюидодинамического фактора. Построенная схема распределения минимумов намагниченности для уровня глубин ≥ 20 км в земной коре подчеркивает распределение наиболее вероятных районов протаивания и ускоренного разрушения льда.

Полученные результаты позволили предположить механизм, влияющий на формирование зимних и летних ледовых условий в виде процесса направленного воздействия флюидного потока на ледовый покров.

Проведенные исследования открывают возможность построения долгосрочных прогнозов состояния ледового покрова с учетом влияния флюидодинамического фактора и тем самым позволяют предсказывать появление зон разрушения льда, что особенно актуально для взрывоопасных областей развития газогидратов.

Кроме того, в процессе работы выявлено, что формирование условий процессов ледообразования, нарастания и сохранения остаточных льдов может зависеть от характера горизонтальной слоистости земной коры. Сделано предположение, что детальное изучение особенностей строения земной коры позволит прогнозировать наиболее вероятные районы скопления остаточных льдов и льдов повышенной сплоченности.

Исследования глубинного строения Арктики имеют научно-практическое и прикладное значения для оценки возникновения опасных природных явлений эндогенного характера, уменьшают риски мореплавания и увеличивают возможность круглогодичного судоходства по Северному Морскому пути.

Основные направления дальнейших исследований представляются в виде изучения горизонтальной слоистости верхней части земной коры и глубоких слоев литосферы СЛО, влияющих на процессы формирования ледяного покрова.

Работа подготовлена в ходе выполнения государственного задания по теме № 16.5. «Исследование физической природы пространственно-временных изменений магнитного поля Земли и солнечно-земных связей» № 0037-2014-000 (2022 г.) и в рамках государственной программы РФ «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» (Указ Президента РФ от 05.03.20 г. № 164).

Список литературы [References]

- Атлас ледяных образований / Под общей редакцией В.М. Смоляницкого. СПб.: ААНИИ, 2019. 232 с. [Atlas of ice formations. Ed. V.M. Smolyanitsky. St. Petersburg: AARI, 2019. 232 p. (in Russian)].
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В. и др.* Дегазация земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. 2019. Т. 4. № 36. С. 52–68. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-4-52-68> [*Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Bogoyavlensky I.V. et al.* Earth degassing in the Arctic: comprehensive studies of the distribution of frost mounds and thermokarst lakes with gas blowout craters on the Yamal Peninsula // Arctic: Ecology and Economy. 2019. V. 4. Iss. 36. P. 52–68 (in Russian)].
- Быков В.Г.* Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 721–754. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0369> [*Bykov V.G.* Prediction and observation of strain waves in the Earth // Geodynamics & Tectonophysics. 2018. V. 9. Iss. 3. P. 721–754 (in Russian)].
- Гарагаш И.А., Лобковский Л.И.* Деформационные тектонические волны как возможный триггерный механизм активизации эмиссии метана в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 42–50. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-42-50> [*Garagash I.A., Lobkovsky L.I.* Deformation tectonic waves as a possible trigger mechanism for the activation of methane emissions in the Arctic // Arctic: Ecology and Economy. 2021. V. 11. Iss. 1. P. 42–50 (in Russian)].
- Данилова Ю.В., Шумилова Т.Г.* Расчет температур флюидогенной углеродизации в зонах разломов // Материалы всероссийского совещания «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы». ИЗКСОРАН. Иркутск. 2015. С. 59–61 [*Danilova Yu.V., Shumilova T.G.* Calculation of fluidogenic carbonization temperatures in fault zones // Materials of the All-Russian meeting «Fluid regime of endogenous processes of the continental lithosphere». IECSBRAS. Irkutsk. 2015. P. 59–61 (in Russian)].
- Егоров А.Г.* Летняя кромка льдов и осенние сроки устойчивого ледообразования в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в 1981–2018 гг. // Лед и Снег. 2021. Т. 61. № 1. С. 117–127. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010075> [*Egorov A.G.* Positions of the summer ice edge and autumn dates of stable ice formation in the Laptev, East-Siberian and Chukchi seas in 1981–2018 // Ice and Snow. 2021. V. 61. Iss. 1. P. 117–127 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Латышева О.В., Петрова А.А.* Влияние разломных зон земной коры на эволюцию толщины и кромки ледяного покрова Арктики // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2020. Вып. 674. С. 207–212 [*Kopytenko Yu.A., Latysheva O.V., Petrova A.A.* Influence of fault zones of the Earth's crust on the evolution of the thickness and edge of the Arctic ice cover // Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. 2020. Iss. 674. P. 207–212 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Мировые карты компонент магнитного поля Земли эпохи 2020 // Труды XV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2020. С. 288–291 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* World maps of the Earth's magnetic field component of the epoch 2020 // Materials of XV conf. «Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics». Saint Petersburg. 2020. P. 288–291 (in Russian)].
- Летников Ф.А.* Глубинные флюиды континентальной литосферы // Материалы всероссийского совещания «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы». ИЗКСОРАН. Иркутск. 2015. С. 11–21 [*Letnikov F.A.* Deep fluids of the continental lithosphere // Materials of the All-Russian meeting «Fluid regime of endogenous processes of the continental lithosphere». Irkutsk. 2015. P. 11–21 (in Russian)].
- Миронов Е.У., Клячкин С.В., Макаров Е.И. и др.* Особенности ледовых процессов в осенний период 2021 г. в морях Российской Арктики и оценка оправдываемости ледовых прогнозов // Российская Арктика. 2021. Т. 4. № 15. С. 40–53. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-4-40-53> [*Mironov E.U., Klyachkin S.V., Makarov E.I. et al.* Sea ice processes in the Russian Arctic seas in autumn of 2021 and estimation of ice forecasts accuracy // Russian Arctic. 2021. V. 4. Iss. 15. P. 40–53 (in Russian)].
- Павленкова Н.И.* Роль флюидов в формировании неоднородности земной коры и верхней мантии // Сборник трудов конференции Современная тектонофизика. Методы и результаты. Москва. 2013. С. 56–68 [*Pavlenkova N.I.* Role of fluids in the formation of inhomogeneity of the earth's crust and upper mantle // Sb. trudov konferentsii Sovremennaya tektonofizika. Metody i rezultaty. Moscow. 2013. P. 56–68 (in Russian)].
- Павленкова Н.И.* Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества // Проблемы глобальной геодинамики, второй выпуск под ред. Рунквиста Д.В. М.: ОГГГНРАН, 2003. С. 168–182 [*Pavlenkova N.I.* The structure of the Earth's crust and upper mantle and the mechanism of movement of deep matter // Problems of Global Geodynamics, second edition ed. Rundqvista D.V. OGGGN RAS. Moscow. 2003. P. 168–182 (in Russian)].
- Петрова А.А.* Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля // Сб. трудов ИЗМИРАН. Москва. 2015. С. 412–423 [*Petrova A.A.* Digital maps component of the magnetic field induction vector // Sb. trudov IZMIRAN, Moscow: 2015. P. 412–423 (in Russian)].
- Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны Северного Забайкалья // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. Вып. 41. № 1. С. 37–53. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-37-53> [*Petrova A.A., Kopytenko Yu.A.* Fluid system of the Mamsko-bodaybinskiy mineragenic zone of the Northern Transbaikalia region // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019. № 1(41). P. 37–53 (in Russian)].

- Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Глубинное строение Арктики и Антарктики по магнитным аномалиям компонент и аномалиям силы тяжести // *Космические исследования*. 2022. Т. 60. № 4. С. 331–347. <https://doi.org/10.31857/S0023420622030086> [*Petrova A.A., Latysheva O.V., Kopytenko Yu.A.* Deep Structure of the Arctic and Antarctic according to Component Magnetic and Gravitational Anomalies // *Kosmicheskie issledovaniya*. V. 60. Iss. 4. P. 331–347 (in Russian)].
- Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Природные явления эндогенного происхождения в Арктическом бассейне // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2020. № 4. Вып. 48. С. 37–53. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-49-63> [*Petrova A.A., Latysheva O.V., Kopytenko Yu.A.* Natural phenomena of endogenic origin in the Arctic basin // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2020. № 4(48). P. 37–53 (in Russian)].
- Петрова А.А., Петрищев М.С., Копытенко Ю.А., Латышева О.В.* Выявление флюидоподводящих каналов в Арктических морях по аномалиям магнитного и гравитационного полей // *Материалы Всероссийской конференции: Глобальные проблемы Арктики и Антарктики. ФИЦКИА-РАН. Архангельск* 2020. С. 810–815 [*Petrova A.A., Petrishchev M.S., Kopytenko Yu.A., Latysheva O.V.* Identification of fluid-carrying channels in the Arctic seas by magnetic and gravitational field anomalies // *Proceedings of the International conference «Global Problems of the Arctic and Antarctic»*. FECIAR UrB RAS. Arkhangelsk. 2020. P. 810–815 (in Russian)].
- Попков В.И., Соловьев В.А., Соловьева Л.П.* Газо-гидраты — продукт глубинной дегазации // *Геология, география и глобальная энергия*. 2012. №3. С. 56–67 [*Popkov V.I., Soloviev V.A., Solovieva L.P.* Gas-hydrates — earth's abyssal degasification product // *Geologiya, geographiya and globalnaya energiya*. 2012. Iss. 3. P. 56–67 (in Russian)].
- Репина И.А., Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Хавина Е.М.* Взаимодействие атмосферы и океана в Северном Ледовитом океане по данным измерений в летне-осенний период // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 49–61. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10075> [*Repina I.A., Artyamonov A.Yu., Varentsov M.I., Khavina E.M.* Air-sea interaction in the Arctic ocean from measurements in the summer-autumn period // *Russian Arctic*. 2019. V. 7. P. 49–61 (in Russian)].
- Репина И.А., Тихонов В.В.* Снежицы на поверхности льда в летний период и их связь с климатическими изменениями в Арктике // *Российская Арктика*. 2018. № 2. С. 15–30. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00015> [*Repina I.A., Tikhonov V.V.* Melt pond on the sea ice surface during summer and its connection with Arctic climate change // *Russian Arctic*. 2018. № 2. P. 15–30 (in Russian)].
- Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., и др.* Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 4. С. 65–84. <https://doi.org/10.7868/S0205961416040072> [*Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A. et al.* Satellite microwave radiometry of sea ice of polar regions: a review // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2016. № 4. P. 65–84 (in Russian)].
- Центр «Север» ФГБУ ААНИИ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aari.ru/> (дата обращения 21.08.2022) [Centr «Sever» FGBU AANII [Elektronnyj resurs] URL: <http://aari.ru> (accessed 21.08.2022)].
- Шалина Е.В., Бобылев Л.П.* Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 6. С. 28–41. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41> [*Shalina E.V., Bobylev L.P.* Seaicetrans formations in the Arctic from satellite observations // *Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. V. 14. Iss. 6. P. 28–41 (in Russian)].
- Юлин А.В., Вязигина Н.А., Егорова Е.С.* Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 28–40. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10073> [*Yulin A.V., Vyazigina N.A., Egorova E.S.* Interannual and seasonal variability of Arctic sea ice extent according to satellite observations // *Russian Arctic*. 2019. № 7. P. 28–40 (in Russian)].
- Юлин А.В., Тимофеева А.Б., Павлова Е.А. и др.* Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости российских арктических морей в современном климатическом периоде // *Труды ГОИН*. 2019. № 220. С. 44–60 [*Yulin A.V., Timofeeva A.B., Pavlova E.A. et al.* Interannual and seasonal changes the ice cover in the russian arctic seas in the modern climatic period // *Trudy SOI*. 2019. № 220. P. 44–60 (in Russian)].
- Юлин А.В., Шаратунова М.В.* Долгосрочный прогноз площади остаточных льдов в сентябре в Северном Ледовитом океане // *Российская Арктика*. 2018. № 2. С. 4–14. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00014> [*Yulin A.V., Sharatunova M.V.* Long-range forecast of residual ice area in the Arctic ocean in September // *Russian Arctic*. 2018. № 2. P. 4–14 (in Russian)].
- Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al.* Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor // *Science*. 2017. V. 356. Iss. 6341. P. 948–953. <https://doi.org/10.1126/science.aal4500>
- Andreassen K., Waage M., Serov P. et al.* Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor // *Scientific reports*. 2020. V. 10. Iss. 1. 8450. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65018-9>
- Artemieva I.M.* Global 1°С1° thermal model TC1 for the continental lithosphere: implications for lithosphere secular evolution // *Tectonophysics*. 2006. V. 416. P. 245–277. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.11.022>
- Bogoyavlenskiy V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlenskiy I.* Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // *Geosciences*. 2018. V. 8. Iss. 12. P. 453–470. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120453>
- Bonvalot S., Balmino G., Briais A. et al.* World Gravity Map // *Commission for the Geological Map of the World*. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD. Paris. 2012. <http://bgi.omp.obs-mip.fr>

- International Seismological Centre (2020). On-line Bulletin [Electronic resource]. URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/> (accessed 15.05.2022).
- Mercator Ocean International. [Electronic resource]. URL: <http://bulletin.mercator-ocean.fr/> (accessed 23.05.2022).
- Oakey G.N., Saltus R.W. Saltus Geophysical analysis of the Alpha-Mendeleev ridge complex: Characterization of the High Arctic Large Igneous Province // *Tectonophysics*. 2016. V. 691. Part A. P. 65–84. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.005>
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S. et al. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region // *Earth-Science Reviews*. 2016. V. 154. P. 29–71. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013>
- Petrova A.A., Latysheva O.V., Petrova A.I. Deep Factors of Ice Destruction of the Arctic Ocean // *Problems of Geocosmos-2020: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer, Cham. 2022. P. 41–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_4
- Petrova A.A., Latysheva O.V., Petrova A.I. Specifics of the Earth's Crust Structure in the Potential Gas Hydrate Accumulation Zones of the Arctic Basin. // *Problems of Geocosmos-2020. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. 2022a. Springer, Cham. 2022. P. 25–39. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_3
- Petrova A.A., Latysheva O.V., Petrova A.I. Verification of the Arctic Magnetic Field Component Model Based on Observations on the CHAMP and Swarm Satellites. // *Problems of Geocosmos-2020. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer, Cham. 2022b. P. 53–63. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(03\)80022-9](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(03)80022-9)
- Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost-Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. 2019. V. 9. Iss. 6. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060251>
- Simmons, N.A., Forte A.M., Boschi L., Grand S.P. GyPSuM: A joint tomographic model of mantle density and seismic wave speeds // *Journal of Geophysical Research*. 2010. 115:B12310. <https://doi.org/10.17611/DP/9991624>
- Thebault E., Vigneron P., Langlais B. et al. A Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80 // *Planets and Space*. 2016. V. Iss. 68. Article number 126. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0510-5>
- Yakushev V.S., Semenov A.P., Bogoyavlensky V.I. et al. Experimental modeling of methane release from intrapermafrost relic gas hydrates when sediment temperature change // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. V.149. P. 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.02.007>

IMPACT OF THE FLUID DYNAMIC FACTOR ON THE FORMATION AND CHANGES OF THE ICE COVER IN THE ARCTIC OCEAN

A.A. Petrova, O.V. Latysheva

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia, 199034; e-mail: office@izmiran.spb.ru

Received 26, 2023 March; revised July 17, 2023; accepted September 26, 2023

In recent decades, the reduction in the area of Arctic ice and its thickness has accelerated. These phenomena are associated with global warming. But the ice cover is destroyed not only under the influence of external causes, but also under the influence of the deep fluid-dynamic factor of the lithosphere. The authors analyzed the satellite observations of ice thickness together with the interpretation of the anomalies of the geomagnetic field and the gravity field. The studies made it possible to put forward an assumption about the influence of thermofluid channels of faults on the formation of the ice cover due to a decrease in the thickness of the ice. The paper presents the results of studying the structure of the lithosphere of the Arctic Ocean in the zones of accelerated ice melting above the outlets of thermofluid channels to the bottom surface. The mechanism of influence of the endogenous factor on the processes of ice destruction is considered. It is noted that the nature of the horizontal layering of the earth's crust affects the process of ice formation. Taking into account the fluid dynamic factor and the layering of the earth's crust on the formation of the ice regime can be useful in determining the optimal transport and logistics routes for year-round navigation along the Northern Sea Route and safe navigation.

Keywords: Arctic Ocean, ice cover, fluid dynamic factor.