УДК 550.389; 550.382; 550.34; 504.4 DOI: 10.31431/1816-5524-2020-4-48-49-63

ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ЭНДОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ

© 2020 А.А. Петрова, О.В. Латышева, Ю.А. Копытенко

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

Представлены результаты исследования влияния глубинного фактора на процесс таяния ледяного покрова Северного Ледовитого океана и образования опасных природных явлений. Особенности строения земной коры, способствующие разрушению льда, визуализированы на основе интерпретации аномалий магнитного поля и силы тяжести. Плотностные и магнитные разрезы структур дна построены с учетом сейсмических и сейсмологических данных. Для выявления флюидонасыщенных слоев выполнены двумерные расчеты плотности земной коры Арктики. Анализ спутниковых наблюдений за состоянием льда совместно с интерпретацией гравитационных и магнитных данных позволил выявить природные явления эндогенного происхождения, обусловленные влиянием термофлюидных потоков земной коры. Исследование годовых и сезонных изменений толщины многолетнего льда за период 2007–2020 гг. показало, что определяющую роль на процесс протаивания оказывают флюидоподводящие каналы разломных зон глубинного заложения. Выявлена роль эндогенного фактора в разрушении разновозрастного льда и в возникновении опасных явлений в областях развития гидратов. Это дает возможность прогнозировать локализацию зон изменчивости толщины многолетнего льда, характер разрушения его кромки и уменьшение рисков мореплавания.

Ключевые слова: льды Арктики, земная кора, флюидные каналы, природные явления.

ВВЕДЕНИЕ

Арктика представляет собой один из последних больших слабо изведанных районов мира. Но в настоящее время ситуация изменяется коренным образом. Осуществляется мониторинг температуры и других физических параметров (рис. 1*а*) (NOAA/ESRL..., 2020; NSIDC..., 2020). Спутниковые наблюдения позволяют оценивать состояние ледяного покрова, отслеживать динамику границ разновозрастного льда, межгодовую и сезонную трансформацию ареалов протаивания многолетнего морского льда Северного Ледовитого океана (СЛО) (рис. 1*б–г*) (Репина, Тихонов, 2018; Центр..., 2020; Юлин и др., 2018; Mercator..., 2020; World..., 2020).

С 2000-х годов заметно ускорилось сокращение площади арктического морского льда. Количество многолетних льдов существенно сократилось: с 70% в 1980-х годах до 30–40% к 2012 г. Анализ спутниковых наблюдений годовых и сезонных изменений толщины многолетнего льда Арктики в период с 2007 по 2020 гг. показал, что изменяется не только площадь ледяного покрова, но еще более значительно его толщина. Наиболее наглядно разрушение кромки многолетнего льда проявилось на ледяном покрове самого малого развития зимой 2007–2008 гг. Это позволило исследовать влияние глубинных разломов на локализацию зон разрушений ледового покрытия и оценить роль вертикальных флюидных каналов в зонах выходов к поверхности дна на процесс преобразования ледяного покрова.

Космическими аппаратами (КА) миссии CHAMP и Swarm в околоземном пространстве измерены магнитные аномалии модуля и вертикальная компонента (Z) на высотах 400 и 450 км (Thebault et al., 2010, 2016). Спутниковая информация исключительно важна для решения научных и практических задач в СЛО, в том числе для безопасного освоения Северного морского пути (СМП).

В результате проведения в Арктическом бассейне Россией, Канадой, США, Данией и

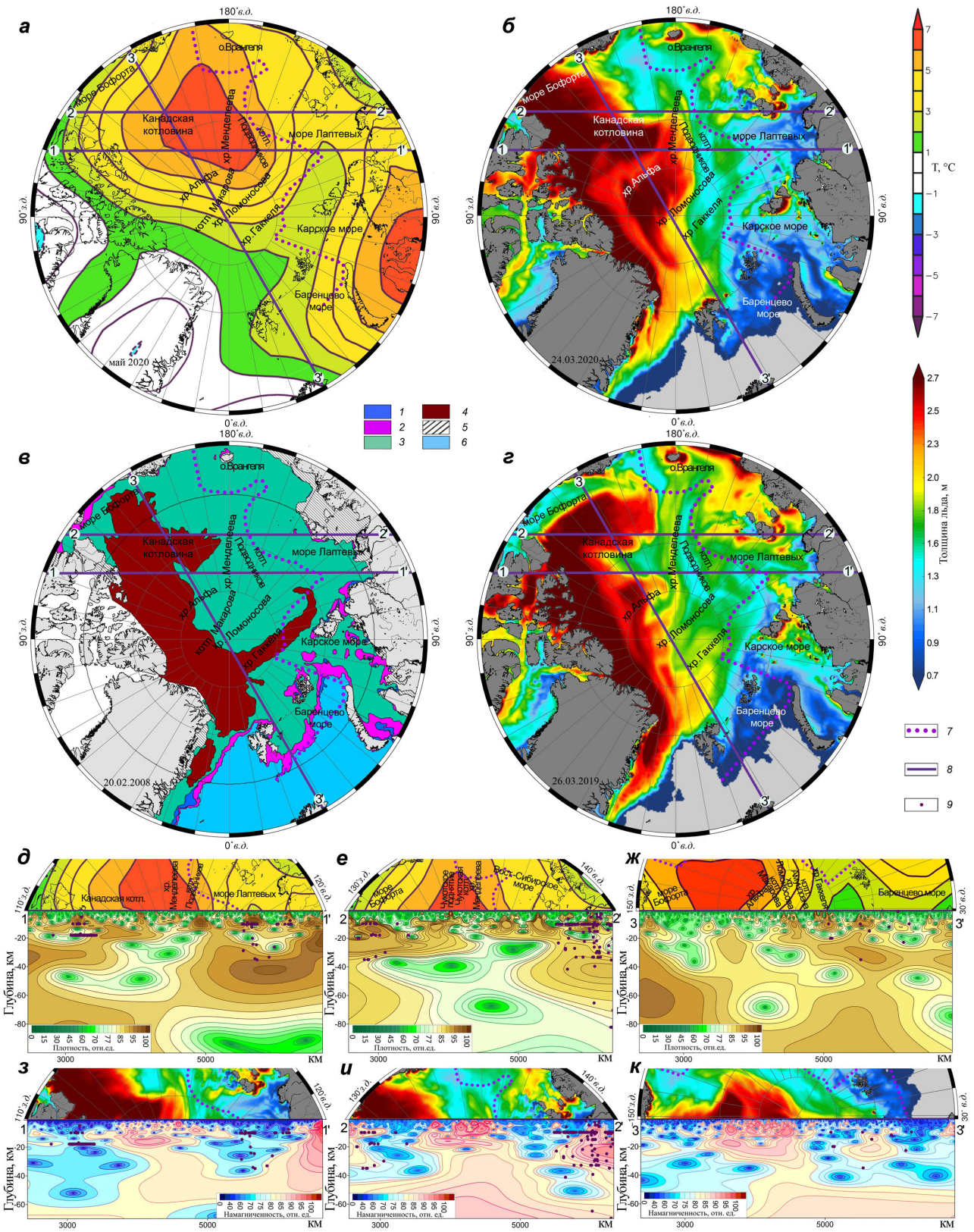

Рис. 1. Состояние ледяного покрова СЛО в зонах выхода флюидных каналов: *а* — температура воздуха (май 2020 г.) (NOAA/ESRL..., 2020); *б* — ледяной покров (март 2020 г.) (Mercator..., 2020); *в* — ледяной покров (февраль 2008 г.) (Центр..., 2020); *г* — ледяной покров (март 2019 г.) (Mercator..., 2020); *д-ж* — плотностные разрезы; *з-к* — магнитные разрезы по аномалиям H-компоненты. *1* — нилас; *2* — молодой лед; *3* — однолетний лед; *4* — старый лед; *5* — припай; *6* — чисто; *7* — северная граница СМП; 8 — положение разрезов; *9* — очаги землетрясений (International..., 2016).

Норвегией комплексных геолого-геофизических экспедиций получены данные о скоростных, плотностных и магнитных характеристиках структур дна океана (Верба, Петрова, 1986; Верниковский и др., 2013; Кабаньков и др., 2008; Карасик, 1980; Кашубин и др., 2016, 2018; Кулаков и др., 2013; Кременецкий и др., 2015; Петрова, Карасик, 1979; Andreeva et al., 2004; Oakey, Saltus, 2016).

Вдоль направлений, совпадающих с сейсмическими и другими геофизическими (гидроакустическими, методом отраженных волн) исследованиями, авторами выполнены расчеты плотностных и магнитных разрезов земной коры (рис. 2*а*). Разрезы построены по аномалиям магнитного поля Земли (МПЗ) (Копытенко, Петрова, 2020а) и аномалиям поля силы тяжести (Bonvalot et al., 2012) методом спектрально-пространственного анализа (Петрова, 1976, 1977; Петрова, Копытенко, 2019; Петрова, Колесова, 1986; Петрова, Портнова, 1980; Petrova et al., 1992, 2019).

С целью идентификации и уточнения физических параметров геологических образований, выявляющихся на плотностных и магнитных разрезах, проведено сопоставление с разрезами, построенными по сейсмическим данным. Для получения представлений о раздробленности фундамента подводных поднятий и типе разломных зон СЛО применена технология исследования литосферы, опробованная нами в других регионах (Копытенко, Петрова, 2016, 2018; Копытенко и др., 2019а, 2019б; Петрова, 2015; Петрова, Копытенко, 2019; Litvinova, Petrova, 2013, 2014; Litvinova et al., 2010; Petrova et al., 2011, 2019).

В процессе работы определялся характер распределения флюидных систем в земной коре СЛО и траектории флюидоподводящих каналов глубинного заложения. Благодаря этому в настоящей работе впервые выявлены причины локального протаивания многолетнего льда с образованием разводий и снежниц. Намечены зоны, которые можно рассматривать как наиболее вероятные выходы к поверхности дна термофлюидных потоков. Они приурочены локальным разрушениям ледового покрова СЛО, формированию кромки разновозрастного льда, а в областях развития гидратов — взрывоопасных зон, возникающих под влиянием глубинного природного фактора.

ПРОЯВЛЕНИЯ ЭНДОГЕННОГО МЕХАНИЗМА ТАЯНИЯ ЛЬДА В СЛО

Для оценки влияния глубинных разломов на характер локализации разрушения многолетнего льда и формирования кромки однолетнего льда проведен анализ зон, приуроченных к выходам термофлюидных каналов. Пути миграции флюидных потоков отображаются в виде каналов на плотностных (рис. 1*д–ж*) и магнитных (рис. 1*з–к*) разрезах. Они пересекают разные слои земной коры, выделяясь пониженными плотностными свойствами и низкой намагниченностью (Павленкова, 2013, 2018; Петрова, Копытенко, 2019; Petrova et al., 2019).

Отклик на климатические изменения рассмотрен на примере среднемесячных температур воздуха акватории Арктики (NOAA/ESRL..., 2020). Сопоставление аномалий температуры с минимальными значениями ледовитости (период 2007–2020 гг.) и с толщиной ледяного покрова (Репина, Тихонов, 2018; Центр..., 2020; Юлин и др., 2018; Mercator..., 2020) показал, что локализация протаиваний льда, в том числе распределение разводий и проталин, не всегда коррелирует с границами среднемесячных значений температуры.

В результате исследования выявлены локальные районы протаивания как результат направленного воздействия термофлюидных каналов глубинного заложения (рис. 1*а*), т. е. обусловлены причинами эндогенного характера. Например, в Канадской котловине, в море Бофорта, котловине Макарова, море Лаптевых зоны усиленного таяния льда расположены в охлажденной части положительной температурной аномалии (рис. 1*а–г*). Они приурочены к выходам флюидоподводящих каналов, по которым термофлюидный поток может поступать из земной коры с глубин 20–50 км (рис. 1*д–ж*). Расчеты, выполненные в процессе работы, подтвердили расположение зон разрушения и протаивания морского льда в осенние сезоны 2007–2019 гг. вблизи выходов термофлюидных потоков с глубин низов земной коры и мантии.

Выявление местоположений выходов каналов к морскому дну позволяет прогнозировать локализацию зон таяния многолетнего льда и деструкцию кромки однолетнего льда.

Очаги землетрясений на разрезах подчеркивают положение вертикальных и латеральных

Fig. 1. The Arctic Ocean ice cover condition in the zones of fluid channel outlets: *а* —air temperature (May 2020) (NOAA / ESRL..., 2020); *б* — ice cover (March 2020) (Mercator..., 2020); *в* — ice cover (February 2008) (Centr.., 2020); *г* — ice cover (March 2019) (Mercator..., 2020); *д-ж* — density sections; *з-к* — magnetic sections based on H-component anomalies. *1* — nilas; *2* — young ice; *3* — one-year ice; *4* — old ice; *5* — fast ice; *6* — clean; *7* — northern border of the NSR; *8* — the position of the sections; *9* — earthquake foci (International..., 2016).

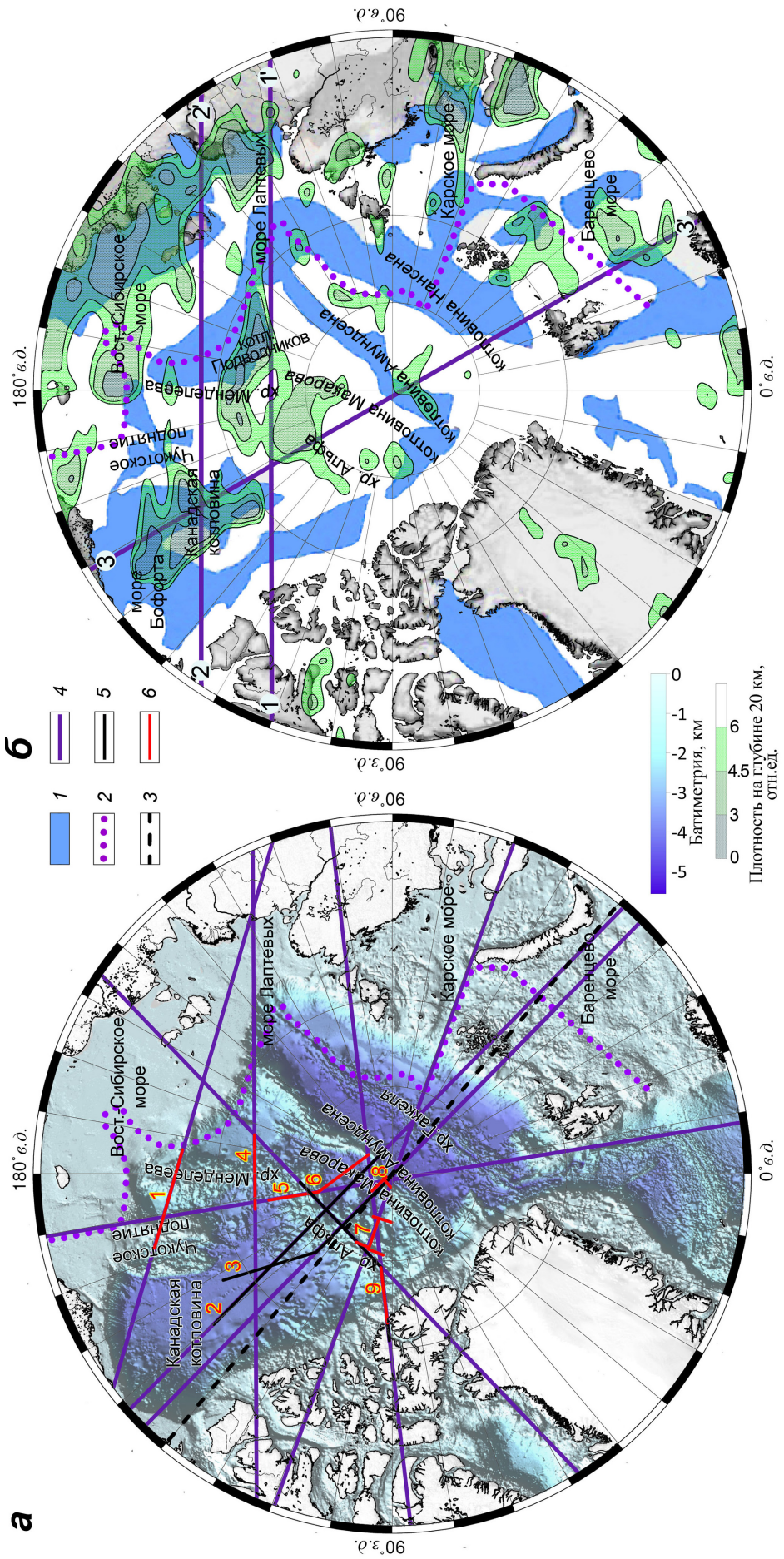

Рис. 2. Арктический бассейн: *а* — батиметрия (Amante, Eakins, 2009); *б* — схема распределения гидратов (Shakhova et al., 2019) и ареалы минимумов плотности на глубине 20 км. *1* — гидраты; *2* — северная граница СМП; *3* — трасса орбиты КА Swarm (высота 450 км); *4–6* —профили: *4* — плотностные, *5* — гидроакустические, *6* — сейсмические.

Fig. 2. Arctic Basin: *a* — bathymetry (Amante, Eakins, 2009), *б* — diagram of the hydrates distribution (Shakhova et al., 2019) and areas of density minima at a depth of 20 km. *1* — hydrates; *2* — northern boundary of the NSR; *3* — Swarm orbit trail (altitude 450 km). Profiles: *4* — density; *5* — hydroacoustic; *6* — seismic.

разломов, выявляют контакты пород разной плотности, что существенно для оценки глубины залегания флюидонасыщенных слоев и каналов. На профилях 1–3 очаги землетрясений приурочены к плотностным границам вблизи кровли и подошвы земной коры (рис. 1*д–ж*).

Флюидоподводящие каналы приурочены к зоне разрывных нарушений (разломов) глубинного заложения, которая прослеживается на сейсмических, плотностных и магнитных разрезах как ослабленная зона с пониженными плотностными и магнитными свойствами (Павленкова, 2013; Петрова, Копытенко, 2019; Петрова, Петрищев, 2011; Petrova et al., 2019).

В процессе работы авторами статьи была проведена оценка степени влияния флюидоподводящих каналов земной коры на возникновение локальных зон ускоренного сезонного таяния многолетнего льда и разрушения кромки однолетнего льда. Результаты анализа годовых и сезонных изменений толщины многолетнего льда Арктики в период с 2008 по 2020 гг. показали, что определяющую роль в процессе протаивания льда создают вертикальные разломные зоны глубинного заложения. Самое значительное разрушение кромки многолетнего льда зимой 2007–2008 гг. позволило выявить направленное влияние вертикальных каналов на локализацию зон таяния многолетнего ледового покрытия и оценить разрушительную роль на процесс преобразования разновозрастного ледяного покрова в зонах выходов термофлюидных каналов к поверхности дна.

Схема наиболее вероятного расположения опасных зон создается на основе обнаружения вертикальных термофлюидных каналов, подпитывающихся из флюидных слоев, выделяющихся на скоростных разрезах как зоны инверсии скорости и на плотностных разрезах в виде линз с пониженными плотностными свойствами на глубине около 20 и 40 км.

С целью выявления флюидонасыщенных слоев, питающих термофлюидные каналы, выполнены двумерные расчеты плотности земной коры Арктики. Плотностные свойства в площадном варианте для акватории СЛО рассчитаны на глубине срезов 20 и 40 км. Глубины уровней срезов определены на основе разрезов по минимумам плотности и с учетом толщины слоев земной коры.

На профилях, пересекающих минимумы плотностных срезов, видно, что к ареалам минимумов приурочены флюидные каналы, образующие локальные зоны сезонного протаивания льда. Например, на плотностных и магнитных разрезах, пересекающих минимумы плотности в море Бофорта, в центральной части Канадской котловины, в котловине Подводников, в котловине Амундсена, в Баренцевом море термофлюидные потоки могут выходить с глубин 50–60 км, оказывая влияние на уменьшение толщины льда, образование проталин и формирование кромки разновозрастных ледовых покрытий (рис. 1*в–к*; 2*б*). Кроме того, при наличии областей газогидратов такие ареалы могут представлять собой зоны, в которых вероятны взрывоопасные природные явления (рис. 2*б*).

По результатам площадных расчетов плотности и разрезам в акватории морей вдоль трасс СМП определены основные районы выходов флюидовыводящих разломов глубинного заложения, вызывающих природные явления эндогенного происхождения. Потенциально опасные зоны проявляются в виде минимумов плотности в Восточно-Сибирском море, море Лаптевых (рис. 1*д*; 2*б*), в Карском и Баренцевом морях (рис. 2*б*). Анализ особенностей глубинного строения литосферы позволил выявить специфику локализации сезонного протаивания ледового покрова СМП.

По результатам интерпретации аномалий силы тяжести, сейсмических и сейсмологических данных намечены районы выходов флюидовыводящих разломов глубинного заложения в Арктическом бассейне и в акваториях морей СЛО (рис. 2*б*).

Анализ плотностных срезов и разрезов земной коры позволил выявить местоположение глубокофокусных систем флюидонасыщенных слоев, которые при наличии сейсмического события могут выступать как спусковой механизм воздействия флюидных потоков разломных зон земной коры на процесс разрушения ледового покрытия.

ПЛОТНОСТНЫЕ И СКОРОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАГНИТОАКТИВНЫХ СЛОЕВ ЗЕМНОЙ КОРЫ АМЕРАЗИЙСКОГО БАССЕЙНА

Для оценки физических свойств и идентификации границ слоев земной коры в процессе работы проведено сопоставление плотностных разрезов с данными сейсмических наблюдений, выполненных в акватории Амеразийского бассейна СЛО (рис. 2) (Кулаков и др., 2013; Oakey, Saltus, 2016). Скоростные характеристики хорошо согласуются с полученной картиной распределения неоднородностей на плотностных разрезах, а изменение плотности с глубиной коррелирует со скоростными параметрами слоев земной коры.

Основной объем сейсмических и других геофизических (гидроакустических, методом отраженных волн) работ проведен на подводных поднятиях хребта Альфа и Менделеева (рис. 2*а*) (Кулаков и др., 2013; Gusev et al., 2017; Lebedeva-

Ivanova et al., 2006; Oakey, Saltus, 2016; Petrov et al., 2016). В настоящей работе плотностные разрезы построены по аномалиям силы тяжести (Bonvalot et al., 2012), магнитные — по аномалиям модуля (T), вертикальной (Z) и горизонтальной (H) компонент МПЗ, рассчитанных по модели СПбФ ИЗМИРАН (Копытенко, Петрова, 2016, 2018, 2020а, 2020б; Петрова, 2015).

На сейсмическом профиле 1 (рис. 2*а*), пересекающем северную часть хребта Менделеева (Lebedeva-Ivanova et al., 2006), горизонт с высокой плотностью и намагниченностью (по аномалиям T, Z, H) расположен на глубине 10—14 км. Он приурочен к слою между границами со скоростями 6.4—7 км/с.

На сейсмическом профиле 4 (рис. 2*а*), пересекающем южную часть хребта Менделеева, на глубине 10—15 км расположен горизонт с высокой плотностью и намагниченностью (по аномалиям T, Z, H), приуроченный к слою между границами со скоростями 6.3—6.8 км/с. Плотность слоя составляет 2.81—2.87 кг/м^3 (Кашубин и др., 2018).

На сейсмическом профиле 5 (рис. 2*а*), пересекающем хребет Альфа, горизонт с высокой плотностью и намагниченностью (по аномалиям T, Z, H) расположен на глубине 10—15 км и приурочен к слою между границами со скоростями 6.5-6.9 км/с. Плотность слоя (2.65—2.98) кг/м^3 (Oakey, Saltus, 2016).

На геофизическом профиле 3 (рис. 2*а*), пересекающем хребет Альфа, горизонт с высокой плотностью и намагниченностью (по аномалиям T, Z, H) расположен на глубине 10—15 км и приурочен к слою с плотностью 2.9 кг/м^3, магнитной восприимчивостью (25—85)×10^{-3} ед. Си и термоостаточной намагниченностью — 7 А/м (Oakey, Saltus, 2016). Нижележащий горизонт на глубине 15—22 км оценивается как слой с плотностью 3.0 кг/м^3 и восприимчивостью (25—85)×10^{-3} ед. Си.

На геофизическом (гидроакустическом) профиле 2 (рис. 2*а*) горизонт с высокой плотностью и намагниченностью (по аномалиям T, Z, H) на глубине 10—25 км приурочен к слою хребта Альфа с плотностью 2.8 кг/м^3 и магнитной восприимчивостью (25—60)×10^{-3} ед. Си (Oakey, Saltus, 2016). Анализ плотностного и магнитных разрезов показал, что в море Бофорта профиль 2-2' (рис. 1*е*, 1*и*; 2*б*) пересекает мощный разуплотненный и слабомагнитный канал выхода тепла из низов земной коры и мантии с глубины ~40 км. Этот термофлюидный канал, пересекаемый профилем 3-3', хорошо виден на плотностном и еще более ярко на магнитных разрезах (рис. 1*ж*; 1*к*; 2*б*). Флюидный поток влияет на динамику разрушения границ многолетнего морского льда, межгодовую и сезонную трансформацию толщины разновозрастного льда и скорость разрушения кромки ледового покрова в море Бофорта (рис. 1*а*-*г*).

Геофизические профили 2 и 3 (рис. 2*а*), пересекаясь вблизи отрога хребта Альфа, выявляют его продолжение в фундаменте Канадской котловины в виде уплотненного и сильно намагниченного слоя на глубине около 10—20 км (130°—150° з.д. и 85°—87° с.ш.). Магнитные и плотностной разрезы отрога хребта Альфа представлены на профиле 3—3' (рис. 1*ж*, 1*к*; 2*б*) и на профиле по трассе KA Swarm (рис. 3). Магнитный горизонт отрога расположен на глубине 10—15 км и приурочен к слою со скоростями (6.5—6.9) км/с, плотностью 2.8 кг/м^3, магнитной восприимчивостью (25—60)×10^{-3} ед. Си. Наиболее четко этот горизонт выражен в H- и Z-компонентах МПЗ.

На геофизическом профиле 6 (рис. 2*а*) горизонт с высокой плотностью и намагниченностью (по аномалиям T, Z, H) расположен на глубине 5—12 км и приурочен к слою хребта Альфа с плотностью 2.9 кг/м^3, магнитной восприимчивостью 85×10^{-3} ед. Си и термоостаточной намагниченностью — 7 А/м (Oakey, Saltus, 2016).

Нижележащий горизонт хребта Альфа зафиксирован геофизическим профилем 6 в интервале глубин 12—25 км. Он оценивается как слой с плотностью 3.0 кг/м^3, магнитной восприимчивостью (25—85)×10^{-3} ед. Си и термоостаточной намагниченностью 7 А/м. Намагниченный слой нижнего горизонта хорошо выражен на магнитном разрезе 3—3' (рис. 1*к*).

Идентификация маркирующих слоев дала возможность уточнить глубину залегания и местоположение разуплотненных и слабомагнитных зон в виде флюидонасыщенных линз и слоев, и оценить глубину залегания термофлюидных каналов. Так, например, на всех пересечениях хребта Альфа проявляются разуплотненные слои и линзы в интервале глубин 15—25 км и 35—40 км (рис. 1*ж*).

Исследования показали, что активное воздействие на локализацию сезонного таяния многолетних льдов и конфигурацию границ старого и однолетнего льда оказывают выходящие к поверхности дна термофлюидные каналы. От глубины залегания канала зависит температура потока флюидов, которая влияет на скорость разрушения льда. В районе котловины Подводников выход мощного разуплотненного вертикального термофлюидного канала мантийных потоков фиксируется на плотностных разрезах с глубины более 80 км (рис. 1*д*). Флюидный канал формирует здесь зоны локального разрушения многолетнего льда и сезонную кромку ледового покрытия (рис. 1*б*; 1*г*).

Наиболее ярко магнитоактивные горизонты хребта Альфа представлены на профиле вдоль трассы KA Swarm, секущей хребет вкрест про-

стирания (рис. 2*а*; 3). Орбита KA Swarm проходит через высокоамплитудную магнитную область Арктического бассейна, ярко проявляющуюся в околоземном пространстве на высоте 450 км в аномалиях Z-компоненты (рис. 3*б*) (Копытенко, Петрова, 2016, 2018, 2020а, 2020б; Петрищев и др., 2019; Oakey, Saltus, 2016; Olsen, Pauluhn, 2019; Thebault et al., 2016). Трасса пересекает траекторию магнитного полюса, переместившегося за 100 лет из Канадского арктического архипелага в Амеразийский бассейн (рис. 3*в*). В 2010–2015 гг. магнитный полюс находился в районе хребта Альфа. В 2020 г. он достиг котловины Макарова и движется в сторону п-ва Таймыр к Мировой магнитной Сибирской аномалии (Kopytenko et al., 2019).

Линейно вытянутые в широтном направлении магнитные аномалии T хребта Альфа вблизи поверхности Земли имеют интенсивность 500–1500 нТл (Litvinova, Petrova, 2013, 2014). Интерпретация показала, что основные источники аномалий магнитоактивной зоны хребта Альфа расположены на глубинах 6–11 и 15–21 км. На глубине 6–11 км расположен маркирующий горизонт с высокой плотностью и намагниченностью.

В разрезе по приземным значениям аномалий Z-компоненты (рис. 3*б*) выделяется вертикально намагниченный слой на глубине 15–21 км. Он приурочен к мощной разломной зоне пониженной плотности, четко прослеженной по разрезу до 27 км и, возможно, проходящей до разуплотненной линзы на глубине ~40 км (рис. 3*а*). Флюидный поток по вертикальному разлому выходит к котловине Макарова, что приводит к локальному разрушению многолетнего льда (рис. 1*в–г*).

Слабомагнитный слой, прослеживающийся по разуплотненным линзам на глубине 33–43 км, приурочен к окраине плотных образований в низах литосферы, подстилающих древнюю Северо-Американскую платформу (рис. 3*а*).

Анализ плотностных разрезов показал, что хребты Альфа и Менделеева расположены над мощной субвертикальной разломной зоной, идущей с глубины 40–50 км (рис. 1*д–ж*). На магнитных разрезах показано, что разлом заполнен магнитоактивными образованиями в верхней и в нижней части земной коры (рис. 1*з–к*; рис. 3*а*). Слои, намагниченные вертикально, создают интенсивные аномалии Z- компоненты (рис. 3*б*), намагниченные горизонтально — интенсивные аномалии H-компоненты (рис. 3*в*).

В районе хребтов Альфа и Менделеева, а также в котловинах Макарова, Подводников и Канадской, на поднятиях Чукотском и Нортвинд вблизи поверхности океана аномалии T достигают 1000 нТл, Z-компоненты — 700 нТл. Так как главные значения модуля и вертикальной компоненты в этих районах вблизи магнитного полюса составляют ~57000 нТл, то повышенные значения аномалий Z-компоненты, по нашему мнению, вполне могут быть обусловлены суммарной — индуктивной, вязкой и термоостаточной — намагниченностью пород.

Однако для палеомагнетизма и тектонических реконструкций наибольший интерес представляют аномалии H-компоненты, выделенные впервые в Амеразийском бассейне СЛО. Вблизи поверхности океана аномалии H-компоненты на хребтах Альфа и Менделеева имеют значения 250–500 нТл (Копытенко, Петрова, 2020б). Вокруг магнитного полюса существует минимум главного поля H-компоненты вектора индукции МПЗ (рис. 3*в*). На магнитном полюсе значение главного поля H-компоненты равно нулю, а в полосе ±300 км составляет менее 500–700 нТл (Копытенко, Петрова, 2018, 2020а; Петрова, 2015; Kopytenko et al., 2019).

В этих условиях интенсивные аномалии H-компоненты хребтов Альфа и Менделеева с амплитудами ~400–500 нТл превышают аномалии, отвечающие намагниченности пород фундамента. Вероятнее всего, магнитоактивные образования хребтов обладают существенной термоостаточной намагниченностью. Она могла возникнуть в тот период, когда в Арктике не было магнитного полюса. Возможно, что магнитные слои земной коры подводных поднятий хребтов Альфа и Менделеева образовались, остывали и намагнитились в других широтах, где главные значения H-компоненты имели большие значения, например, такие как в экваториальной области ~40000 нТл (Копытенко, Петрова, 2018, 2020б; Петрищев и др. 2019; Петрова, 2015).

Физические условия в низах верхней коры благоприятны для образования термоостаточной и вязкой намагниченности (Mandea, Thebault, 2007). Высокие значения магнитных аномалий H- и Z-компонент в околоземном пространстве определяются концентрацией магнетита, индуктивной и термоостаточной намагниченностью нижних горизонтов земной коры, расположенных выше температуры изотермы Кюри.

На основе проведенного исследования нами сделана оценка флюидной проницаемости разломов литосферы, выявлена латеральная стратификация и вертикальная фрагментация земной коры. Полученные результаты дали возможность определить специфику флюидной активности верхней мантии Арктического бассейна и выявить гидротермальные зоны выходов термофлюидных потоков.

Очаги землетрясений на глубинных разрезах расположены на пограничных поверхностях и контактах маркирующих слоев разной плотно-

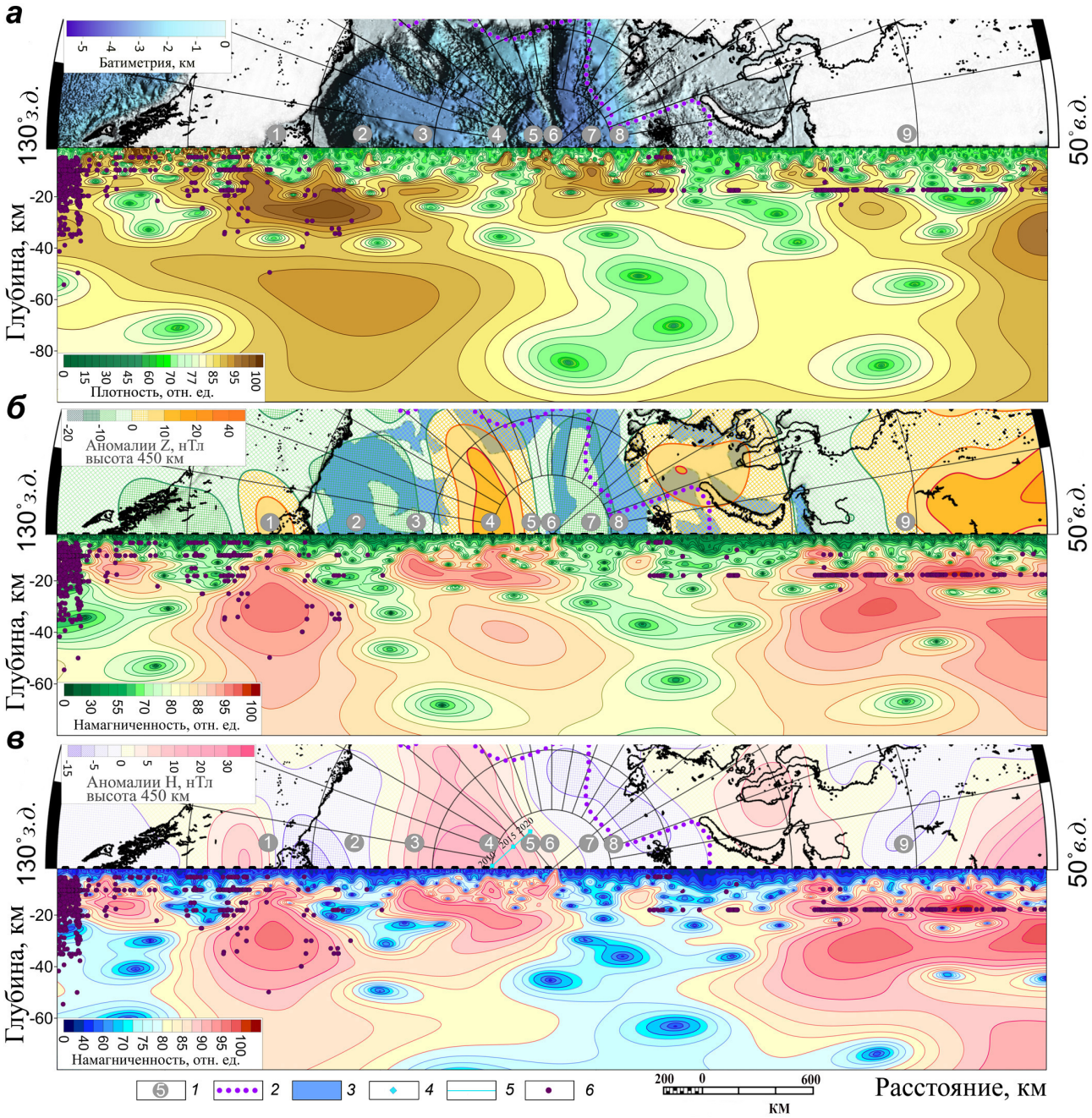

Рис. 3. Разрезы литосферы Арктического бассейна по трассе KA Swarm: *а* — плотностной разрез; *б* — магнитный разрез по аномалиям Z-компоненты на фоне аномалий Z на высоте 450 км (Копытенко, Петрова, 2020а); *в* — магнитный разрез по аномалиям H-компоненты на фоне аномалий на высоте 450 км (Копытенко, Петрова, 2020а). *1* — тектонические структуры; *2* — северная граница СМП; *3* — гидраты; *4* — положение магнитного полюса (эпохи 2010—2020 гг.); *5* — траектория магнитного полюса; *6* — очаги землетрясений (International..., 2016). 1 — Северо-Американская платформа; 2 — море Бофорта; 3 — Канадская котловина; 4 — хребет Альфа; 5 — котловина Макарова; 6 — хребет Ломоносова; 7 — хребет Гаккеля; 8 — котловина Нансена; 9 — Восточно-Европейская платформа.

Fig. 3. Sections of the lithosphere of the Arctic Basin along the Swarm trail: *a* — density section; *б* — magnetic section along the Z-component anomalies against the background of anomalies Z at an altitude of 450 km (Kopytenko, Petrova, 2020a); *в* — magnetic section along the H-component anomalies against the background of anomalies at an altitude of 450 km (Kopytenko, Petrova, 2020a). *1* — tectonic structures; *2* — northern border of the NSR; *3* — hydrates; *4* — position of the magnetic pole (epochs 2010-2020); *5* — trajectory of the magnetic pole; *6* — earthquake foci (International..., 2016). 1 — North American platform; 2 — Beaufort Sea; 3 — Canadian Basin; 4 — Alpha ridge; 5 — Makarov basin; 6 — Lomonosov ridge; 7 — Gakkel Ridge; 8 — Nansen Basin; 9 — East European Platform.

сти и намагниченности. Это позволяет выявить положение контрастных границ неоднородностей литосферы. Анализ данных измерений КА CHAMP и Swarm в околоземном пространстве показал, что сильномагнитные блоки тяготеют к древнейшим устойчивым областям земной коры докембрия (рис. 3) (Копытенко и др., 2019б; Petrova et al., 2019). Большие значения аномалий характерны для докембрийской земной коры (Наливкина, Петрова, 2018). Возможно, что хребет Альфа также возник в докембрийский период.

Анализ глубинных разрезов позволил предположить возможную геологическую и вещественную природу высокоамплитудной магнитной зоны Арктического бассейна (рис. 3*б–в*). Весьма вероятно, что она, в основном, обусловлена магнитоактивным слоем магнетитовой зоны вдоль подошвы верхней коры. Это предположение основывается на сходстве морфологии аномалий H-компоненты и идентичности расположения на глубинных разрезах магнитоактивного слоя высокоамплитудной магнитной зоны и древних геоблоков Восточной Европы (рис. 3) (Наливкина, Петрова, 2018).

В результате сопоставления с сейсмическими данными плотностных и магнитных разрезов исследованы свойства слоев земной коры магнитоактивных зон СЛО. Уточнено местоположение, намагниченность, толщина, плотностные и скоростные свойства разных слоев земной коры, в том числе горизонты, создающие магнитные аномалии в околоземном пространстве. Аномалии компонент позволили получить информацию о состоянии глубинных образований литосферы и подойти к решению вопроса о намагниченности и свойствах источников крупных региональных аномалий, наблюдаемых КА Swarm на высоте 450 км (Петрищев и др., 2019; Thebault et al., 2016).

Для верификации компонентной модели компоненты МПЗ были пересчитаны на высоту полета КА 450 км (рис. 3). Сопоставление наблюденных КА Swarm аномалий Z-компоненты с расчетными значениями в Арктике показало хорошее согласие. На высоте 450 км интенсивность аномалий магнитоактивных зон хребтов составляет ±20 нТл, расхождения аномалий ~2 нТл. Карта аномалий расчетных значений Z-компоненты на высоте 450 км приведена в качестве фона для магнитного разреза по аномалиям Z-компоненты.

Проведенные исследования позволили уточнить представление о глубинном строении подводных поднятий Амеразийского бассейна. На основе комплексной интерпретации магнитных аномалий, аномалий силы тяжести, сейсмических и сейсмологических данных показана возможность выявления флюидовыводящих каналов разломов глубинного заложения.

Анализ компонент МПЗ расширил возможности количественной интерпретации магнитного поля и позволил более достоверно изучить физические процессы в земной коре. Аномалии компонент дали возможность выявить особенности строения литосферы Центрального Арктического бассейна. Особый интерес для исследования характера намагниченности пород в низах литосферы СЛО представляют элементы МПЗ на высотах околоземного пространства.

ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ЭНДОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ЗОНАХ РАЗВИТИЯ ГАЗОГИДРАТОВ

Основные углеводородные перспективы России связаны с освоением ресурсов шельфа арктических морей, среди которых весьма важными являются газовые гидраты. Районы газогидратоносности в акватории СЛО весьма обширны и представляют собой гигантский ресурс углеводородов (УВ).

Гидратонасыщенные пласты служат непроницаемой покрышкой, способствуя консервации залежей УВ и создавая условия для формирования в Арктике зоны специфического приповерхностного интервала нефтегазонакопления в форме твердых газогидратов (Воробьев, 2016). Однако неустойчивое состояние газовых гидратов может вызывать взрывное разрушение их массивов.

Приповерхностный комплекс твердых газогидратов создает факторы риска, осложняя судоходство и разработку морских нефтегазовых месторождений, транспортировку углеводородного сырья. У гигантских месторождений УВ Баренцевоморского и Карского шельфов и прилегающей суши (Уренгойского, Ямбургского, Бованенковского, Штокмановского и др.) возникают проблемы безопасности их эксплуатации.

На полуострове Ямал из-за выброса газогидратов произошло опасное криогенное явление с образованием ямальского кратера (Воробьев, 2016). Анализ плотностных разрезов показал, что это природное явление эндогенного происхождения. Кратер приурочен к мощному вертикальному флюидоподводящему каналу, прослеживающемуся по плотностному разрезу с глубины ~45 км. В мантии на глубине ⩾65 км расположена разуплотненная линза флюидонасыщенного слоя, пульсация которого под действием сейсмического события может стать триггером внезапного взрыва и возникновения термокарста.

Комплексная интерпретация геофизических данных нефтегазоносных провинций

российского сектора СЛО выявила районы выходов флюидных потоков глубинных разломов к областям развития газогидратов. На процесс разрушения многолетней подводной мерзлоты воздействуют разломные зоны, пронизывающие земную кору, по которым выходят термофлюидные потоки под температурой и давлением, зависящими от глубины залегания флюидонасыщенных слоев и каналов (Валяев, 2009; Попков и др., 2012; Andreassen et al., 2017, 2020). Флюидные потоки могут быть причиной внезапного высвобождения метана гидратов. В таких зонах создаются повышенные риски для мореплавания и инфраструктуры СМП.

Плотностные разрезы 1-1', 2-2' и 3-3' пересекают газогидратные области (рис. 1–3), выделяемые как гидраты придонного типа (Павленко, 2013). На плотностном разрезе 1-1' область гидратов в котловине Подводников приурочена к значительной зоне разрывных нарушений земной коры и мантии. Термофлюидный поток в газогидратную область возможен с глубины 40 км, питающие канал флюидонасыщенные слои прослеживаются на глубинах 50 км и 80 км (рис. 1*д*).

На разрезе 2-2' мощная разломная зона выходит к области гидратов в Чукотской котловине. Термофлюидный поток в область гидратов прослеживается с глубины почти 35 км, а его подпитка из флюидонасыщенных слоев – с глубины 40 км и 70 км (рис. 1*е*).

На разрезе 3-3' (рис. 1*ж*) в море Бофорта выходит широкая вертикальная разломная зона, где термофлюидный поток вероятен с глубины 40 км. Именно этот канал способствует разрушению льда и формированию кромки многолетнего льда (рис. 1*в*).

В Баренцевом море на разрезе 3-3' (рис. 1*ж*, 1*к*, 2*б*) выявлена разломная зона, выходящая к области гидратов, хорошо изученной норвежскими исследователями. Норвежские ученые изучили компактный район крупных кратеров на дне Норвежского сектора Баренцева моря. Они сделали вывод, что по зонам разломов из глубинных резервуаров углеводородов просачивался газ, застывший в приповерхностном слое дна в виде залежей твердых газогидратов (Andreassen et al., 2017, 2020).

Интерпретация плотностных разрезов показала, что термофлюидный поток в область гидратов здесь возможен с глубины почти с 30 км, а флюидонасыщенный слой проявляется на глубине 50 км. Аналогичная ситуация выхода флюидного канала в зону гидратов выявляется в районе Штокмановского месторождения Баренцева моря.

Активизация взрывоопасных процессов может создавать риски для газодобывающей и транспортной инфраструктуры на участках выхода термофлюидных каналов к поверхности в области развития гидратов.

На основе двумерного анализа плотностных свойств на глубинах 20 км и 40 км сделана оценка распределения ареалов взрывоопасных природных явлений эндогенного характера. В результате исследования выделены наиболее вероятные зоны возникновения опасных природных явлений на акватории СМП, обусловленных мощным выбросом древнего метана из подводной мерзлоты (рис. 2*б*).

Анализ глубинных разрезов земной коры и мантии позволил выявить местоположение флюидонасыщенных слоев СЛО. Глубокофокусные флюидные системы мантии, выделенные по плотностным разрезам, расположены на глубинах ~40–50 км и ~70–90 км. При наличии сейсмических событий флюидные системы мантии могут выступать в качестве спускового механизма воздействия на флюидные потоки с возникновением взрывоопасных явлений в газогидратоносносных районах.

Анализ плотностных разрезов через нефтегазоносные провинции российского сектора СЛО выявил районы выходов флюидных потоков по разломам в области развития твердых газогидратов, что дало возможность сделать прогноз опасных ареалов, расположенных в акватории СМП. Такая информация позволит выбирать наиболее безопасные трассы мореплавания СМП, как прибрежных трасс, так и высокоширотных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования выявили влияние глубинного фактора на процесс таяния ледяного покрова СЛО и причины возникновения взрывоопасных природных явлений в областях развития гидратов.

Анализ спутниковых наблюдений за состоянием льда и изменением толщины многолетнего льда в период 2007–2020 гг. показал, что определяющую роль на процесс протаивания оказывают флюидоподводящие каналы разломных зон глубинного заложения. Благодаря визуализации на плотностных и магнитных разрезах особенностей строения земной коры выявлены возможные причины эндогенного происхождения, способствующие появлению опасных природных явлений.

Комплексная интерпретация магнитных аномалий модуля и компонент МПЗ, аномалий силы тяжести, сейсмических и сейсмологических данных дала возможность более достоверно изучить физические параметры слоев земной коры подводных поднятий СЛО и выяснить траектории термофлюидных каналов, приуроченных к разломам глубинного заложения.

Анализ плотностных глубинных срезов и разрезов земной коры позволил выявить местоположение глубокофокусных флюидных систем, которые могут выступать в качестве спускового механизма воздействия термофлюидных потоков на эволюцию толщины многолетнего льда и конфигурацию кромки разновозрастного ледяного покрова СЛО.

Для уменьшения рисков мореплавания, развития транспортной инфраструктуры шельфовых морей и освоения морских месторождений Арктики исследована локализация выходов флюидовыводящих разломов глубинного заложения вдоль трасс СМП.

По результатам проведенных геофизических исследований представлена модель глубинного строения основных тектонических структур Арктического бассейна. Расчеты показали, что источники региональных магнитных аномалий, наблюдающиеся в околоземном пространстве, расположены в магнитоактивных горизонтах на глубинах 6–11 и 15–21 км. Магнитный и плотный верхний горизонт маркирует местоположение хребтов Альфа и Менделеева. Маркирующий слой на глубине 15–21 км охватывает хребты и глубоководную часть Канадской котловины Амеразийского бассейна. Аномалии магнитоактивных зон свидетельствуют о том, что породы хребтов Альфа и Менделеева, вероятнее всего, помимо индуктивной намагниченности, обладают термоостаточной намагниченностью. Исследование магнитных аномалий компонент МПЗ вблизи поверхности Земли и в околоземном пространстве имеет научное и прикладное значение для решения поисковых геолого-геофизических задач и вопросов морской и воздушной навигации.

В результате исследования областей гидратов вблизи границы СМП выделены наиболее вероятные зоны возникновения опасных природных явлений на акватории СЛО, обусловленных выбросом древнего метана из подводной мерзлоты. На основе комплексной интерпретации геофизических данных выполнен прогноз взрывоопасных зон СЛО.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания по теме № 16.5. «Исследование физической природы пространственно-временных изменений магнитного поля Земли и солнечно-земных связей» № 0037-2014-000 и Государственной программы РФ «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» (Указ Президента РФ от 05.03.20 г. № 164).

Список литературы [References]

Валяев Б.М. Эндогенные факторы структурно-тектонического и геодинамического контроля процессов нефтегазонакопления // Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва. 2009. № 2. С. 27–30. http://rogov.zwz.ru/Marine%20geology%202009_t_2.pdf [*Valyaev B.M.* Endogenous factors of structural-tectonic and geodynamic control of oil and gas accumulation processes // Proceedings of the XVIII International scientific conference (School) on marine Geology. Moscow. 2009. Iss. 2. P. 27–30. http://rogov.zwz.ru/Marine%20geology%202009_t_2.pdf (in Russian)].

Верба В.В., Петрова А.А. Сравнительная характеристика аномальных магнитных полей Амеразийского суббассейна и древних щитов Евразии и Северной Америки // Структура и история развития Северного Ледовитого океана. Л.: ПГО Севморгеология, 1986. С. 80–86 [*Verba V.V.& Petrova A.A.* The comparative characteristic of anomaly magnetic fields of the Amerasia subbasin and ancient shields of the Eurasia and the Northern America // Structure and a history of development of the Arctic Ocean. Leningrad: PGO “Sevmorgeologia”, 1986. P. 80–86 (in Russian)].

Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В. и др. Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1083–1107 [*Vernikovsky V.A., Dobretsov N. L., Metelkin D. V. et al.* Concerning tectonics and the tectonic evolution of the Arctic // Russian Geology and Geophysics. 2013. V. 54. Iss. 8. P. 838–858. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.006].

Воробьев А.Е. Перспективы нанотехнологий освоения газогидратных ресурсов арктического шельфа России // Вестник МГТУ. 2016. Т.19. №1/1. С. 70–81 https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-1/1-70-81 [*Vorob’yev A.E.* Prospects of nanotechnologies of developing gaseous-hydrate resources of Russian Arctic shelf // Vestnik of MSTU. 2016. V. 19. Iss. 1/1. P. 70–81 (in Russian)].

Гинсбург Г.Д., Грамберг И.С., Соловьев В.А. Геология субмаринных газовых гидратов // Советская геология. 1990. № 11. С. 12–19 [*Ginsburg G.D., Gramberg I.S., Soloviev V.A.* Geology of submarine gas hydrates // Sovetskaia geologiia. 1990. Iss. 11. P. 12–19 (in Russian)].

Кабаньков В.Я., Андреева И.А., Крупская В.В. и др. Новые данные о составе и происхождении донных осадков южной части поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) // ДАН. 2008. Т. 419. № 5. С. 653–655 [*Kaban’kov V.Ya., Andreeva I.A., Krupskaya V.V. et al.* New Data on the Composition and Origin of Bottom Sediments in the Southern Mendeleev Ridge, Arctic Ocean // Doklady Earth Sciences. 2008. V. 419. Iss. 3. P. 403–405. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X08030112].

Карасик А.М. Основные особенности истории развития и структуры дна Арктического бассейна по аэромагнитным данным // Морская геология, седиментология, осадочная петрография и геология Океана. Л.: Недра, 1980. С. 178–193 [*Karasik A.M.* Main features of development history and structure of the Arctic basin bottom based on aeromagnetic data // Marine Geology, sedimentology, sedimentary petrography and Geology of the Ocean. Leningrad: Nedra, 1980. P. 178–193 (in Russian)].

Кашубин С.Н., Петров О.В., Артемьева И.М. и др. Глубинное строение земной коры и верхней мантии поднятия Менделеева по профилю ГСЗ Арктика-2012 // Региональная геология и металлогения. 2016. № 65. С. 16–36 [*Kashubin S.N., Petrov O.V., Artemeva I.M. et al.* Deep structure of crust and the upper mantle of the Mendeleev Rise on the Arktic-2012 DSS profile // Regionalnaya geologiya i metallogeniya. 2016. Iss. 65. P. 16–36 (in Russian)].

Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д. и др. Структура земной коры зоны сочленения поднятия Менделеева с Евразийским континентом (по геофизическим данным) // Региональная геология и металлогения. 2018. № 74. С. 5–18 [*Kashubin S.N., Petrov O.V. Milshtein E.D. et al.* Earth's crust structure of the Mendeleev Rise and its connection with Eurasian continent (by geophysical data) // Regionalnaya geologiya i metallogeniya. 2018. Iss. 74. P. 5–18 (in Russian)

Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 2. С. 88–106. https://elibrary.ru/item.asp?id=27533345 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* The development and use of a component model of the Earth's magnetic field for magnetic cartography and geophysics// Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2016. V. 9. Iss. 2. P. 88–106 (in Russian)].

Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Компоненты морских линейных магнитных аномалий Мирового океана. Ч. 1. Северная Атлантика // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11 № 4. С. 34–41. https://doi.org/10.7868/S2073667318040056 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* Components of marine linear magnetic anomalies of the World ocean. Part 1. North Atlantic // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2018. V. 11. Iss. 4. P. 34–41 (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. 2020а. С. 288–291 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* World maps earth's magnetic field component of the epoch 2020 // Materials of XV conf. «Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics». Saint-Petersburg. 2020a. P. 288–291 (in Russian)].

Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Компоненты магнитных аномалий Амеразийского бассейна // Труды XV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2020б. С. 292–295 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* Components of magnetic anomalies in the Amerasian basin // Materials of XV conf. «Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics». Saint-Petersburg. 2020b. P. 292–295 (in Russian)].

Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Латышева О.В. Магнитные аномалии литосферы в околоземном космическом пространстве // Материалы научной конференции «Магнетизм на Земле и в космосе». Москва. 2019а. С. 91–95. https://doi.org/10.31361/pushkov2019.021. https://ru.files.fm/u/76r557qh [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A., Latysheva O.V.* Magnetic anomalies of the lithosphere in near-earth space // Proceedings of the scientific conference «Magnetism on Earth and in space». Moscow. 2019a. P. 91–95 (in Russian)].

Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Алексеев В.Ф. и др. Применение высотных моделей магнитного поля Земли для решения геофизических задач // Космические исследования. 2019б. Т. 57. № 3. С. 185–191. https://doi.org/10.1134/S0023420619030063 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A., Alekseev V. F. et al.* Application of high-altitude models of the Earth's magnetic field for solving geophysical problems // Cosmic Research. 2019b. V. 57. Iss. 3. P. 163–168. https://doi.org/10.1134/S0010952519030067].

Кременецкий А.А., Костицын Ю.А., Морозов А.Ф., Рекант П.В. Источники вещества магматических пород поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. 2015. Т. 53. № 6. С. 487–500. https://doi.org/10.7868/S0016752515060059 [*Kremenetskii A.A., Kostitsyn Y.A., Morozov A.F., Rekant P.V.* Sources of the magmatic rocks of the Mendeleev rise, Arctic ocean: evidence from isotope-geochemical data // Geochemistry. 2015. V. 53. Iss. 6. P. 487–500. https://doi.org/10.1134/S0016702915060051].

Кулаков И.Ю., Гайна К., Добрецов Н.Л.и др. Реконструкции перемещений плит в Арктическом регионе на основе комплексного анализа гравитационных, магнитных и сейсмических аномалий // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1108–1125 [*Koulakov I.Yu. Gaina C., Dobretsov N.L. et al.* Plate reconstructions in the Arctic region based on joint analysis of gravity, magnetic, and seismic anomalies // Russian Geology and Geophysics. 2013. V. 54. Iss. 8. P 859–873. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.007].

Кульпин Л.Г., Ефимова Г.Х. Природные особенности освоения месторождений углеводородов в Баренцевом море // Neftegaz. RU. 2014. № 10. С. 29–33 [*Kulpin L.G., Efimova G.Kh.* Natural features of the development of hydrocarbon deposits in the Barents sea // Neftegaz.RU. 2014. Iss. 10. P. 29 – 33. (in Russian)].

Наливкина Э.Б., Петрова А.А. Магнетитовая зона земной коры континентов. СПб.: Изд. ВСЕГЕИ, 2018. 46 с. https://elibrary.ru/item.asp?id=41117840 [*Nalivkina E.B., Petrova A.A.* The magnetite zone of the continental crust. SPb: Izd. VSEGEI, 2018. 46 p. https://elibrary.ru/item.asp?id=41117840 (in Russian)].

Павленко В.И. Арктическая зона Российской Федерации в системе обеспечения национальных интересов страны // Арктика: экология и экономика. 2013. № 4 (12). С. 16–25 [*Pavlenko V.I.* The Arctic zone of the Russian Federation in the system of ensuring the national interests of the country // Arctic: ecologiya and economika. 2013. Iss. 4(12). P 16–25 (in Russian)].

Павленкова Н.И. Природа региональных сейсмических границ в земной коре и верхней мантии // Сборник трудов физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле. Москва. 2018. С. 250–253 [*Pavlenkova N.I.* Nature of regional seismic boundaries in the earth's crust and upper mantle // Sb. trudov fiziko-khimicheskie i petrofizicheskie issledovaniia v naukakh o zemle. Moscow. 2018. P. 250–253 (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 Sovremennaia tektonofizika. Metody i rezultaty. Moscow. 2013. P. 56–68 (in Russian)].

Петрищев М.С., Петрова А.А., Копытенко Ю.А., Латышева О.В. Магнитные аномалии докембрия в околоземном пространстве // Материалы 17 конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса». ИКИ РАН. Москва, 2019. С. 162–163. http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=162&thesis=7840 [*Petrishchev M.S., Petrova A.A., Kopytenko Yu.A., Latysheva O.V.* Precambrian magnetic anomalies in near-earth space // Materials 17 Conf. «Modern problems of remote sensing of the earth from space». SRI RAS. 2019. Moscow, 2019. P 162–163. http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=162&thesis=7840 (in Russian)].

Петрова А.А. Методика спектрально-корреляционного анализа аномального геомагнитного поля // Автореф. дисс. канд. ф.-м. наук. Москва, 1976. 25 с. [*Petrova A.A.* Method of spectral correlation analysis of an anomalous geomagnetic field // Avtoref. Diss. kand. ph.-m. nauk. Moscow, 1976. 25 p. (in Russian)].

Петрова А.А. Методика спектрально-пространственного анализа геомагнитного поля // Геофизический сборник АН УССР. 1977. Вып. 76. С. 55–66 [*Petrova A.A.* Method of spectral-spatial analysis of the geomagnetic field // Geofizicheskii sbornik AN USSR.1977. Iss. 76. P. 55–66 (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., Карасик А.М. Статистическая зависимость параметров спектральной структуры магнитного поля от рельефа магнитного фундамента Северного Ледовитого океана // Океанология. 1979. Т. XIX. № 3. С. 526–528 [*Petrova A.A. Karasik A.M.* Statistical dependence of the parameters of the magnetic field spectral structure on the relief of the magnetic foundation of the Arctic ocean // Oceanology. 1979. V. XIX. Iss. 3. P. 526–528 (in Russian)].

Петрова А.А., Колесова В.И. Способ геофизической разведки. А.С. 1289232 СССР. 1986 [*Petrova A.A., Kolesova V.I.* Method of geophysical exploration. A.S. 1289232 USSR. 1986 (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. V. 1(41). P. 37–53 (in Russian)].

Петрова А.А., Петрищев М.С. Флюидные системы Средиземноморья // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Выпуск №17. С. 23–33 [*Petrova A.A., Petrishchev M.S.* Fluid systems of the Mediterraneann // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2011. V. 1(17). P. 23–33 (in Russian)].

Петрова А.А., Портнова В.П. Спектральная структура геофизических полей некоторых платформенных областей территории СССР // Прикладная геофизика. 1980. Вып. 102. С. 56–64 [*Petrova A.A., Portnova V.P.* Spectral structure of geophysical fields in some platform regions of the USSR territory // Prikladnaia geofizika. 1980. Iss. 102. P. 56–64 (in Russian)].

Попков В.И., Соловьев В.А., Соловьева Л.П. Газогидраты - 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., Тихонов В.В. Снежницы 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 // Rossijskaya Arktika. 2018. Iss. 2. P. 15–30 (in Russian)].

Центр «Север» ФГБУ ААНИИ [Электронный ресурс]. URL: http://www.aari.ru/ (дата обращения 31.03.2020) [Centr «Sever» FGBU AANII [Elektronnyj resurs] URL: http://aari.ru (accessed 31.03.2020)].

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 extene according to satellite observations // Rossijskaya Arktika. 2019. Iss. 7. P. 28–40 (in Russian)].

Amante C., Eakins B.W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. 2009. P. 1–19. https://doi.org/10.7289/V5C8276M.

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. https://doi.org/10.1038/s41598-020-65018-9.

Andreeva I.A., Gricurov G.E., Kaban'kov V.Ya. et al. Large-sized rock fragments in bottom sediments sampled on Mendeleev Rise and adjacent deep seabed duaring «Arctic-2000» cruise: mode of occurrence, lithology, age, provenance // NGF Abstracts and Proceedings. 2004. V.2. P. 9–10.

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.

Gusev E., Rekant P., Kaminsky V. et al. Morphology of seamounts at the Mendeleev Rise, Arctic Ocean // Polar Research. 2017. V. 36. Iss. 1. P. 1–10. http://doi.org/10.1080/17518369.2017.1298901.

International Seismological Centre (2020). On-line Bulletin [Электронный ресурс]. URL: https://doi.org/10.31905/D808B830 (дата обращения 15.05.2020).

Kopytenko Yu.A., Chernouss S., Petrova A.A. et al. The Study of Auroral Oval Position Changes in Terms of Moving of the Earth Magnetic Pole // Problems of Geocosmos–2018. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. P. 289–297. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_25.

Lebedeva-Ivanova N. N., Zamansky Yu.Ya., Langinen Aldona E., Sorokin Michael Yu. Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82°N: evidence of continental crust // Geophysical Journal International 2006. V. 165. Iss. 2. P. 527–544. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02859.x.

Litvinova T., Petrova A. Lithospheric sources of magnetic anomalies of the Aldan shield and Alpha Ridge // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. Vienna. 2013. V. 15. EGU2013-2578.

Litvinova T., Krasinsky E., Petrova A., Demina I. Manifestation of the petrogeneration zones of Northern and the Bering seas in ground magnetic anomalies and anomalies of satellite Champ. // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. Vienna. 2010. V. 12. EGU2010-6575-1.

Litvinova T., Petrova A. Features of the structure of the lithosphere of the Arctic Ocean near the Gakkel Ridge, the Alpha and Lomonosov // Proceedings of the Geological Society of Norway. Tromso. 2014. Iss. 2. P. 31–34.

Mandea M., Thebault E. The Changing Faces of the Earth's Magnetic Field. Paris. 2007. 49 p.

Mercator Ocean International [Электронный ресурс]. URL: http://bulletin.mercator-ocean.fr (дата обращения 23.05.2020).

NOAA/ESRL Physical Sciences Laboratory [Электронный ресурс]. http://psl.noaa.gov (дата обращения 26.06.2020).

Oakey G.N., Saltus R.W. 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.

Olsen N., Pauluhn A. Exploring Earth's magnetic field – Three make a Swarm. Spatium. 2019. V. 43. P 3–15.

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., Demina I., Petrishchev M. Detection of the deep approach fluid channels in the oil-and-gas basins using the geomagnetic data (North and Norwegian Seas) // Proc. 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM). Trondheim. 2011. P. 523–529.

Petrova A.A., Kopytenko Y.A., Petrishchev M.S. Deep fluid systems of Fennoscandia greenstone belts // Practical and Teoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. 2019. C. 239–247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_28.

Petrova A.A., Kolesova V.I., Domaratskij S.N. The Space-Spectral Analysis Method in Applied Geophysics // Russian Airborne Geophysics and Remote sensing. Golden. Colorado. 1992. P. 525–534.

Polar portal — Monitoring Ice and Climate in the Arctic [Электронный ресурс]. URL: http://polarportal.dk/ (дата обращения 06.04.2020).

Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Geosciences Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // Geosciences. 2019. V. 9. № 6. P. 1–23. https://doi.org/10.3390/geosciences9060251.

Thebault E., Purucker M., Whaler K. et al. The magnetic field of the Earth's lithosphere // Space Science Reviews. 2010. V. 155. Iss. 1. P. 95–127.

Thebault E., Vigneron P., Langlais B., Hulot G. A Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80 // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. Iss. 1. P. 1–13. https://doi.org/10.1186/s40623-016-0510-5.

World Data Center Sea Ice file server. Available at: http://wdc.aari.ru (accessed 09.04.2020).

NATURAL PHENOMENA OF ENDOGENIC ORIGIN IN THE ARCTIC BASIN

A.A. Petrova, O.V. Latysheva, Yu.A. Kopytenko

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia, 199034

The results of the study of the influence of the deep factor on the process of melting of the ice cover of the Arctic Ocean and the formation of dangerous natural phenomena are presented. The peculiarities of the structure of the earth's crust contributing to the ice destruction are visualized based on the interpretation of anomalies of the magnetic field and gravity. Density and magnetic sections of the bottom structures are constructed taking into account seismic and seismological data. Two-dimensional density calculations of the Arctic crust density have been performed to detect fluid-saturated layers. Analysis of satellite observations of ice condition together with interpretation of gravity and magnetic data made it possible to identify natural phenomena of endogenous origin, caused by influence of thermo fluid flows of the earth's crust. The study of annual and seasonal changes in the thickness of multiyear ice over the period 2007–2020 has shown that a decisive role in the thawing process is played by fluid-supplying channels of deep-seated fault zones. The role of an endogenous factor in the destruction of ice of different ages and in the emergence of dangerous phenomena in the areas of hydrate development has been revealed. This makes it possible to predict the localization of zones of variability in the thickness of multiyear ice, the nature of the destruction of its edges and reduce the risks of navigation.

Keywords: Arctic ice, earth crust, fluid channels, natural phenomena.

Поступила в редакцию 27.07.2020 г.
После доработки 17.10.2020 г.
Принята в печать 16.12.2020 г.