

УДК 504

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ ПО МАГНИТНЫМ АНОМАЛИЯМ КОМПОНЕНТ И АНОМАЛИЯМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

© 2022 г. А. А. Петрова¹ *, О. В. Латышева¹, Ю. А. Копытенко¹

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*aa_petrova@inbox.ru

Поступила в редакцию 03.05.2021 г.

После доработки 28.07.2021 г.

Принята к публикации 25.08.2021 г.

Представлены результаты исследования глубинного строения полярных областей Земли на основе интерпретации аномалий силы тяжести, аномалий геомагнитного поля и сейсмологических данных. По измерениям на спутниках *CHAMP* и *Swarm* верифицированы векторные модели магнитного поля Арктики и Антарктики. С целью изучения магнитоактивных зон и корней литосферы, наблюдаемых в околоземном пространстве, построены глубинные разрезы. Плотностные разрезы получены по аномалиям силы тяжести, магнитные – по аномалиям модуля и компонент геомагнитного поля. Для оценки климатических рисков проведен совместный анализ глубинных разрезов со спутниковыми данными изменений ледового покрова полярных областей. Он показал, что существенную роль в процессе таяния льда играют вертикальные термофлюидные каналы. Выявлены отличительные особенности очагов таяния, обусловленные эндогенными факторами. Пути миграции флюидных потоков, разрушающих ледяной покров, визуализированы на разрезах в виде каналов с пониженными магнитными и плотностными свойствами. Проведенные исследования позволяют понять возможные причины локализации очагов разрушения льдов и мерзлоты. Показано, что в зонах многолетней мерзлоты древних блоков фундамента возникают термические ареалы сквозных таликов под влиянием тепловых потоков флюидоподводящих каналов. Ареалы таяния могут представлять собой горячие пятна рудных узлов, в пределах которых под воздействием гидротермальных потоков минерализованных флюидов концентрируются месторождения полезных ископаемых. Исследования глубинного строения Арктики и Антарктики имеют научное и прикладное значение для решения поисковых геолого-геофизических задач и оценки климатических рисков.

DOI: 10.31857/S0023420622030086

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является литосфера полярных областей Арктики и Антарктики соответственно к северу от 50° с.ш. и к югу от 50° ю.ш.

Цель работы – изучение глубинного строения литосферы и выявление эндогенных причин деградации ледового покрова полярных областей по геофизическим данным. За последние 23 года произошло увеличение скорости таяния льда на 65%. В основном это вызвано резким увеличением потерь из полярных ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии.

Основная задача исследования Арктики и Антарктики – выявление элементов литосферы, способствующих разрушению льда под влиянием глубинного фактора. Особенности строения земной коры визуализированы в результате комплексной интерпретации аномалий магнитного поля Земли (МПЗ), аномалий силы тяжести и сейсмологических данных. В качестве исходных

данных использованы магнитные аномалии компонент МПЗ вблизи земной поверхности [1, 2], аномалии силы тяжести [3] и сейсмологические данные (<http://www.isc.ac.uk>).

На основе актуализированной базы аномалий компонент МПЗ и модели главного магнитного поля IGRF-13 созданы карты полных значений компонент полярных областей Земли на эпоху 2020 г. [2, 4]. По данным спутниковых измерений *CHAMP* и *Swarm* [5] выполнена верификация векторных моделей МПЗ Арктики и Антарктики.

При уточнении представлений о глубинном строении Арктики наибольшее внимание уделено магнитоактивным зонам, наблюдаемым в околоземном пространстве. Это Центральная магнитная зона Северного Ледовитого океана (СЛО) и древние блоки земной коры Евразии и Гренландии.

Для выполнения этой задачи выполнены расчеты протяженных глубинных разрезов, пересе-

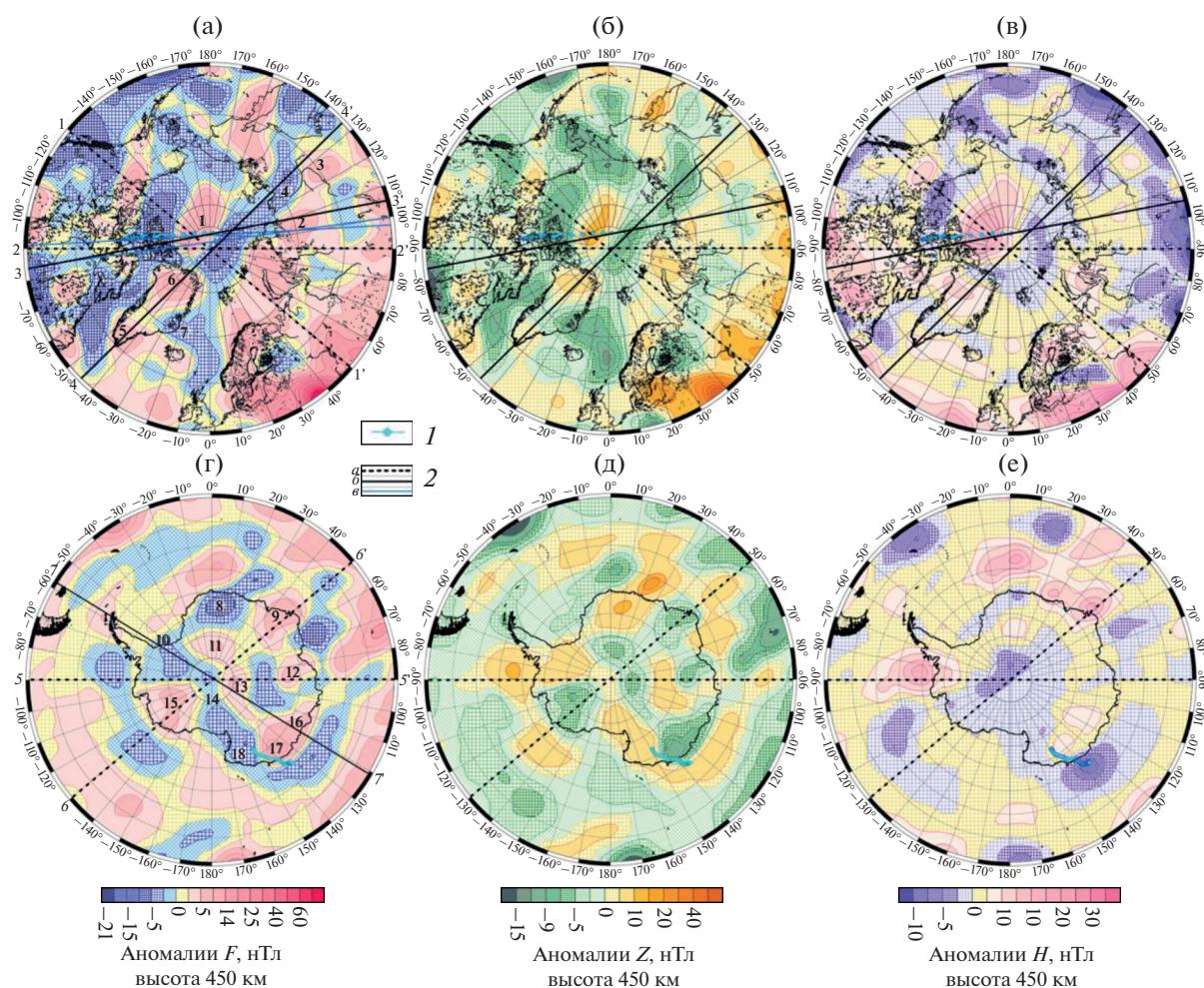


Рис. 1. Магнитные аномалии модуля F , Z - и H -компоненты полярных областей на высоте 450 км [2]: Арктика (а, б, в); Антарктика (г, д, е). 1 – траектория перемещения магнитного полюса 1900–2020 гг.; 2 – положение глубинных разрезов: (а) – трассы орбит КА *Swarm*; (б) – разрезы, представленные в статье; (в) – разрезы, опубликованные авторами ранее.

кающих хребты Альфа и Менделеева СЛО (1), корни литосферы Восточной Сибири: Ленский (2) и Якутский (3), Верхоянскую астеносферную линзу (4), на юге Гренландии архейский кратон (5) и на севере – магнитный блок (6) (рис. 1а).

В Антарктике глубинные разрезы, выполненные по трассе орбит КА *Swarm*, пересекают магнитоактивные зоны в Западной Антарктиде – Земли Мэри Бэрд (15) и в Восточной Антарктиде – Западной (11) и Восточной (13) равнин, а также кратонов – Земли Эндерби (9) и принцессы Елизаветы (12) (рис. 1г).

Разрезы построены по магнитным аномалиям и аномалиям поля силы тяжести методом спектрально-пространственного анализа [6–9]. Идентификация физических параметров геологических образований плотностных и магнитных разрезов осуществлена по скоростным разрезам, полученным в акватории СЛО [10], и сейсмологическим данным. На глубинных разрезах Аркти-

ки и Антарктики приведены гипоцентры землетрясений. Приуроченные к контактам пород разной плотности, они позволяют оценить глубину заложения разломных зон и положение основных слоев земной коры.

При исследовании строения литосферы полярных областей акцент сделан на вопросах, связанных с глубинной природой разрушения многолетнего льда. Изучение эндогенной деградации ледового покрова проведено на основе анализа спутниковых данных сезонных и годовых трансформаций льда.

В Арктике рассмотрены последствия влияния глубинного фактора на интенсивное таяние льда СЛО, многолетней мерзлоты России и ледового щита Гренландии. На примере Восточной Сибири исследована специфика литосферы и возможные причины стабильности вечной мерзлоты. В Антарктике оценено влияние термофлюидных

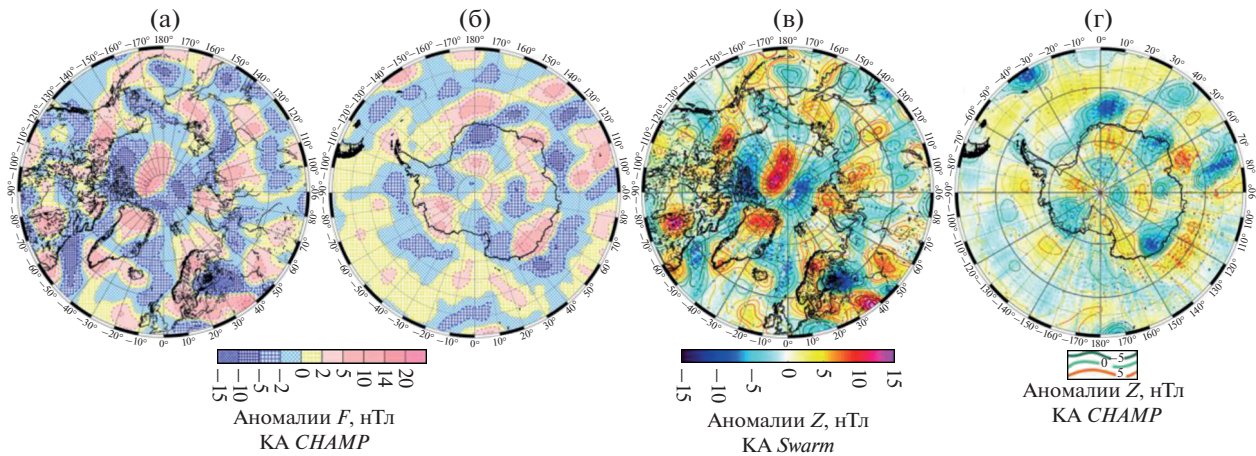


Рис. 2. Аномалии модуля F и Z -компоненты МПЗ (КА *CHAMP* и *Swarm*) [6]. Арктика (а, б); Антарктика (в, г).

каналов и флюидной системы земной коры на состояние ледового щита и шельфовых ледников.

Картирование местоположений выходов флюидоподводящих каналов в зонах многолетней мерзлоты Сибири, Гренландии и Антарктиды позволило диагностировать минерагению зон сквозных таликов, возникающих в древних блоках фундамента под влиянием выходов к поверхности термофлюидных каналов.

ВЕРИФИКАЦИЯ ВЕКТОРНЫХ МОДЕЛЕЙ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

В 2020 г. в СПбФ ИЗМИРАН обновлена цифровая база аномалий модуля и компонент МПЗ [2]. Мировые карты полных значений на эпоху 2020 г. созданы с использованием дополненной базы аномалий и главного магнитного поля МПЗ по модели IGRF-13 [2, 4]. Трехмерная векторная модель МПЗ актуализирована на основе цифровой базы обновляемых магнитометрических данных, содержащих как измеренные, так и расчетные значения элементов геомагнитного поля (F , D , I , H , Z , X , Y), вычисленные по оригинальной технологии, разработанной в институте на основе модульной информации [1]. Цифровая пространственная модель позволяет делать прогнозы аномалий компонент в широком диапазоне высот от уровня океана до ионосферных слоев околоземного пространства. Благодаря этому возможно исследование магнитоактивных горизонтов и линз флюидонасыщенных слоев земной коры и мантии, что исключительно важно для изучения глубинного строения литосферы и решения геолого-геофизических задач.

Для земного шара оценка погрешности компонентной модели МПЗ получена по результатам сопоставления расчетов модели с векторными данными аэромагнитных съемок и измерениями

компонент на геомагнитных обсерваториях Мировой сети [1, 2, 11].

Контроль достоверности по всему земному шару осуществлен сравнением в околоземном пространстве расчетных значений по компонентной модели и измеренных аномалий модуля (F) и Z -компоненты КА *CHAMP* на высоте 400 км [1, 11]. Хорошее согласие аномалий с независимыми оценками измерений на КА характеризует высокую степень достоверности, что обеспечивает поддержку векторной модели при расчетах элементов МПЗ на высотах околоземного космического пространства.

Для исследования литосферы полярных областей Земли построены цифровые модели аномалий F , Z - и H -компонент геомагнитного поля на приземном уровне и на высотах околоземного пространства (рис. 1).

Результаты измерений КА *CHAMP* и КА *Swarm* магнитных аномалий F , Z -компоненты и векторной модели МПЗ представлены в полярной стереографической равноугольной проекции на высоте 450 км (рис. 1–2). Верификация модели компонент Арктики и Антарктики проведена путем сопоставления расчетных значений магнитных аномалий с наблюдаемыми значениями на высотах полета спутников *CHAMP* и *Swarm*.

Сравнение магнитных аномалий F и Z -компоненты МПЗ, измеренных КА *CHAMP* и *Swarm*, с расчетными значениями показало согласие спектральной структуры, пространственной конфигурации и расположения аномалий. Среднеарифметическое значение расхождений аномалий F и Z -компоненты по данным КА и модели аномалий компонент составляет $\sim 1.5\text{--}2.0$ нТл, доверительный интервал ± 0.05 нТл. На этих высотах амплитуда аномалий МПЗ достигает $\pm 15\text{--}20$ нТл.

Сопоставление аномалий, вычисленных по трехмерной векторной модели СПбФ ИЗМИРАН,

с независимыми наблюдениями на спутниках показало высокое качество модели, построенной на основе приземных аэро- и гидромагнитных модульных съемок.

Опыт построения магнитных моделей магнитоактивных слоев Арктики показывает, что наиболее наглядное представление о магнитном поле глубинных источников создают аномалии F , Z - и H -компонент МПЗ на высотах околоземного пространства. В акватории Арктики на высоте 400–450 км во всех трех элементах ярко выделяются интенсивные магнитные аномалии хребтов Альфа и Менделеева (1) (рис. 1а) [11, 12]. Трасса орбиты КА *Swarm* (профиль 1–1') пересекает крупную магнитоактивную зону СЛО, приуроченную к хребту Альфа (1) (рис. 1).

В Антарктике магнитоактивные зоны проявляются интенсивными аномалиями модуля МПЗ в Западной Антарктиде на плато базальтов и террейне на Земле Мэри Бэрд (15) (рис. 1г). В Восточной Антарктиде интенсивные аномалии F приурочены к кратону докембрийского фундамента и равнинам древней платформ. В Антарктике эти структуры представлены отрицательными значениями аномалий Z -компоненты.

На высоте околоземного пространства Западная и Восточная Антарктида четко разделены глубоким минимумом аномалий F и цепочкой аномалий Z -компоненты МПЗ по линии морей Уэдделла–Росса, которые являются главными звеньями мощной Западно-Антарктической мезозойско-кайнозойской рифтовой системы, заполненной осадками до 10–15 км (рис. 1г, 1д, 2б, 2г).

Карты компонент МПЗ наглядно отражают сведения о характере намагниченности неоднородностей земной коры. Наибольший интерес аномалии элементов МПЗ представляют для исследований литосферы труднодоступных регионов Арктики и Антарктики [12].

Глубинные разрезы по аномалиям компонент МПЗ позволяют определить форму, конфигурацию, местонахождение, характер намагничивания и природу магнитоактивных тел, а также взаимное расположение магнитных и слабомагнитных геологических образований.

На основе глубинных разрезов по аномалиям компонент МПЗ разработаны региональные критерии поиска долгоживущих месторождений углеводородов, геотермальных зон, железистых кварцитов, термальных зон земной коры, перспективных на поиски золоторудных месторождений и коренных алмазов и др. [1, 8, 11, 13–18]. Аномалии компонент представляют большой интерес для решения поисковых геолого-геофизических задач и разрешения вопросов палеотектоники и геодинамики.

Хорошее качество пространственной векторной модели МПЗ позволяет использовать ее в морской, воздушной и космической навигации.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ АРКТИКИ

Объектом проведенного исследования особенностей строения литосферы в Арктике являются зоны ледового покрова СЛО, многолетней мерзлоты России и ледового щита Гренландии.

Для выявления особенностей строения литосферы этих зон построены глубинные разрезы по магнитным аномалиям компонент МПЗ на приземном уровне, аномалиям силы тяжести и сейсмологическим данным (рис. 1–3). Магнитные разрезы построены по аномалиям F , Z и H -компонент МПЗ [2], плотностные разрезы – по аномалиям силы тяжести. Магнитные разрезы по модулю и компонентам МПЗ уточнили характер намагниченности горизонтов земной коры. Плотностные разрезы демонстрируют хорошую согласованность с распределением плотностных неоднородностей, полученным по сейсмическим разрезам хребтов Американо-Азиатского бассейна СЛО [19].

Совместный анализ глубинных разрезов по аномалиям компонент МПЗ и аномалиям силы тяжести с учетом сейсмологических данных позволил осуществить визуализацию неоднородностей земной коры, линз флюидных систем и траекторий термофлюидных каналов. Выходы флюидных каналов к зонам ледовых покровов приводят к разрушению льда под действием причин эндогенного характера.

ЛИТОСФЕРА МАГНИТОАКТИВНЫХ ЗОН АРКТИКИ

Глубинные разрезы по профилю 3–3' (рис. 1, 3) пересекают две крупные магнитоактивные зоны Арктики – Центральную магнитную зону (1) СЛО и Ленский корень литосферы (2) Восточной Сибири, наблюдаемые на околоземных высотах (рис. 1а).

Центральная магнитная зона СЛО отражается в магнитных аномалиях на высоте полета спутников. Она охватывает хребты Альфа и Менделеева, поднятия Чукотское и Нортвинд, котловины Канадскую, Макарова и Подводников [20, 21].

Магнитные разрезы по F и Z -компоненте продемонстрировали наиболее магнитоактивные горизонты подводных поднятий хребтов Альфа и Менделеева (рис. 3б–3в). Вблизи поверхности океана на хребтах Альфа и Менделеева аномалии F достигают 1000–1500 нТл, аномалии Z -компоненты – 800 нТл, H -компоненты – 300–600 нТл МПЗ [2, 22, 23]. Источники магнитных аномалий Z - и H -компонент хребта Альфа, представляют собой два горизонта – на глубине 5–12 и 15–22 км. Они приурочены к

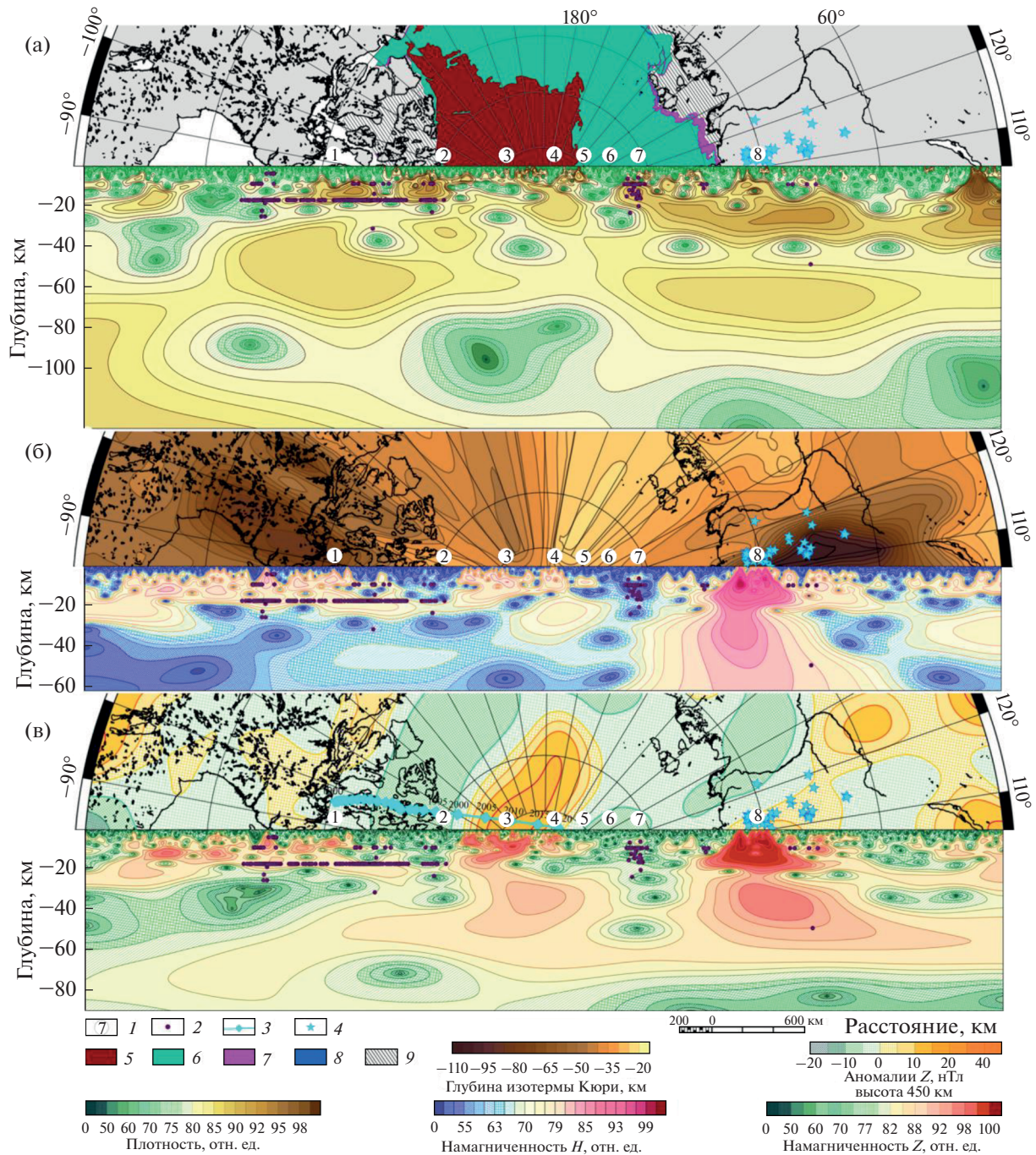


Рис. 3. Разрезы литосферы Арктики по профилю 3–3' (хр. Альфа–Ленский литосферный корень): (а) – плотностной разрез, подоснова – ледовое покрытие СЛО (февраль 2020 г.) [http://www.aari.ru/]; (б) – магнитный разрез по аномалиям *H*-компоненты, подоснова – глубина изотермы Кюри [24]; (в) – магнитный разрез по аномалиям *Z*-компоненты, подоснова аномалии на высоте 450 км [2]. 1 – физико-географические элементы: 1 – Северо-Американская платформа; 2 – Канадский архипелаг; 3 – хр. Альфа; 4 – котловина Макарова; 5 – хр. Ломоносова; 6 – котловина Амундсена Евразийского бассейна; 7 – хр. Гаккеля; 8 – Восточная Сибирь (Ленский литосферный корень). 2 – землетрясения; 3 – траектория перемещения магнитного полюса 1900–2020 гг.; 4 – кимберлиты; 5 – старый лед; 6 – однолетний лед (30–200 см); 7 – молодой лед; 8 – нилас; 9 – припай.

разломной зоне, идущей с глубины 40–50 км (рис. 3а). На магнитных разрезах видно, что разломная зона заполнена магнитными образованиями, намагниченными вертикально и горизонтально

(рис. 3б, 3в). Положение подошвы намагниченных образований хребта Альфа на глубине около 40 км согласуется с данными о температуре Кюри [24, 25], которая для титаномagnetита составляет ~560°C.

Повышенные значения аномалий F и Z -компоненты хребта Альфа обусловлены суммарной индуктивной и термоостаточной намагниченностью пород вблизи магнитного полюса (МП). Вместе с тем, разрез по H -компоненте МПЗ обнаружил древние блоки фундамента СЛО (рис. 1в; рис. 3б), создающие, по-видимому, только термоостаточную намагниченность, возникшую в более раннюю эпоху, так как в настоящее время хребты расположены вблизи МП, где значение главного поля H -компоненты МПЗ близко к нулю [26]. Аналогичный результат получен на глубинных разрезах, пересекающих Центральную магнитную зону СЛО по профилям 1–1', 2–2' и другим, опубликованным ранее (рис. 1а) [12, 19].

На основе комплексной интерпретации плотностных и магнитных разрезов с учетом глубины залегания поверхностей изотермы 1300°C и Кюри [24], гипоцентров землетрясений, глобальной модели мантийных плотностей и зон пониженной скорости [27] создано общее представление о распределении неоднородностей в земной коре и мантии Центральной магнитной зоны СЛО до глубины 100 км (рис. 3б).

На глубине около 100 км в океанах находится астеносфера, которая под материками погружается до 200 км, совпадая с изотермой 1300°C [24]. Астеносфера фиксируется понижением скорости сейсмических волн [27] и является одной из причин эндогенных процессов, протекающих в литосфере.

Визуализация разрезов позволила получить информацию о взаимном расположении и соотношениях глубинных слоев литосферы, мощности, местоположении, намагниченности и плотности источников региональных аномалий. Расчеты показали, что основной источник региональных аномалий СЛО, прослеживающихся в околосреднем пространстве на высотах 400–450 км, представляет собой намагниченный слой Центральной магнитной зоны на глубине 15–20 км.

Кроме того, проведенные исследования в центральной части СЛО выявили местоположение выходов флюидовыводящих каналов к поверхности морского дна, направленное действие теплового потока по которым приводит к ускоренной локальной деградации льда, уменьшению толщины многолетнего ледяного покрова и формированию границы однолетнего льда (рис. 3а). Термальный канал, выходящий в зону развития гидратов акватории котловины Амундсена, прослеживается в магнитных и плотностном разрезах по разломной зоне с глубины около 60 км. Питательная канал мощная линза флюидной системы расположена на глубине 90–110 км. Она четко коррелирует с глобальной моделью зон инверсий скоростей [27], которая подтверждает наличие крупной мериди-

ональной зоны пониженных скоростей в СЛО на глубине ≥ 100 км вдоль 180° в.д.

Некоторые последствия разрушения льда под влиянием термального потока флюидов мантии представлены на примере Арктического бассейна [19, 28, 29]. Однако такая же проблема, связанная с деструкцией льда в сквозных таликах, возникающих под действием эндогенных причин, характерна для зоны вечной мерзлоты Восточной Сибири [30, 31] и чрезвычайно актуальна для ледяных щитов Гренландии и Антарктиды.

Ленский литосферный корень (ЛнЛК) – один из наиболее крупных известных корней литосферы Восточной Сибири (рис. 1а) [31–33]. Намагниченный киль блока ЛнЛК, прослеживающийся до глубины более 50 км, вблизи земной поверхности создает интенсивные аномалии F , Z - и H -компонент МПЗ до 5000 нТл [31].

Комплексный анализ магнитных и плотностных разрезов, поверхности изотерм 1300°C и Кюри, гипоцентров землетрясений, глобальной модели мантийных плотностей [27] позволил выявить намагниченность, толщину и плотностные свойства ЛнЛК. Ленский корень литосферы представляют собой мощный субвертикальный блок повышенной плотности и намагниченности [31]. Толщина плотного блока корня составляет более 100 км (рис. 3а) и соответствует глубине изотермы 1300°C [24, 31]. Глобальная модель мантийных плотностей подтверждает утолщение и допускает глубину корня более 250 км. Совместный анализ магнитных разрезов, данных о поверхности Кюри и тепловом потоке [24] показал, что положение подошвы намагниченного корня литосферы согласуется с данными о температуре земной коры и верхней мантии ЛнЛК (рис. 3б).

На глубинах вблизи подошвы ЛнЛК существуют благоприятные физические условия для образования термоостаточной и индуктивной намагниченности F и Z -компоненты МПЗ [24]. Однако аномалии H -компоненты МПЗ, по всей вероятности, обусловлены преимущественно остаточной намагниченностью пород, так как ЛнЛК расположен в зоне минимума главного поля H -компоненты МПЗ на линии продвижения МП к Сибирской магнитной аномалии (рис. 1в, 3в) [26]. Поэтому значения аномалий H - с амплитудами ~ 1000 нТл на уровне океана отражают, вероятнее всего, термоостаточную намагниченность пород, возникшую ранее. Возможно, что термоостаточная намагниченность ЛнЛК образовались ближе к экватору, где главное поле H -компоненты имеет максимальные значения [2, 34].

Анализ глубинных разрезов через месторождения Якутской алмазоносной провинции, учет данных глобальной модели мантийных плотностей и глубины залегания изотермы Кюри показали, что месторождения алмазов приурочены к

ЛнЛК (рис. 3б) [31]. В результате интерпретации аномалий компонент МПЗ, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных получено представление о строении литосферы кимберлитовой провинции, которое подтвердило, что месторождения алмазов тяготеют к корню литосферы.

Кроме того, исследование литосферы зоны вечной мерзлоты Восточной Сибири показало, что к районам с мощными корнями литосферы тяготеют зоны со стабильной толщиной ледяного горизонта [30, 31, 35]. Сделано предположение, что стабильность ледяных горизонтов многолетней мерзлоты обеспечивается холодными блоками корней литосферы, перекрывающими тепло мантии [31].

Минерогения сквозных таликов. Проведенное исследование в зоне вечной мерзлоты Восточной Сибири показало, что термические ареалы таяния — сквозные талики, возникающие под влиянием выходов к поверхности термофлюидных каналов, в докембрийских блоках фундамента представляют собой горячие пятна рудных узлов гидротермальных месторождений, образующихся из эндогенных газово-водных растворов [31, 36]. Источником растворов и находящихся в них металлов являются мантийные флюидно-рудные системы. В рудных узлах гидротермальных месторождений создается концентрация цветных и благородных металлов.

Важным фактором образования полезных ископаемых горячих пятен рудных узлов является вынос гидротермальными потоками рудоносных флюидов, поставляемых термофлюидными каналами из глубокофокусных тектонических зон докембрия и верхнемантийных линз [8, 9, 37, 38].

Верхоянская верхнемантийная астенолинза (4) Северо-Азиатского кратона (рис. 1а) представляет собой яркий пример значимости рудоконтролирующего фактора глубинной термофлюидной проработки. В контуре верхнемантийной линзы сформирована Верхояно-Черская золотоносная провинция (рис. 4а), приуроченная к системе глубинных разломов [32, 33].

Месторождения золота находятся внутри Верхоянского регионального магнитного и гравитационного минимумов (60° – 70° с.ш., 125° – 150° в.д.). Наиболее четко минимумы магнитного поля проявились в околоземном пространстве по измерениям спутников *CHAMP* и *Swarm*. Граница Верхоянской астенолинзы очертила глубокие минимумы *F*, *Z*- и *H*-компонент геомагнитного поля в виде зон отрицательных аномалий МПЗ до -7 нТл (рис. 1–2) [5, 12].

На глубинных разрезах представлены плотностные и магнитные свойства флюидного канала и верхнемантийной линзы (рис. 4а). В создании благоприятных условий для формирования высокой золотоносности месторождений в кон-

туре линзы существенная роль принадлежит тепловому потоку термофлюидного канала (рис. 4а), системе подпитывающих флюидонасыщенных линз, выделяемых по плотностным разрезам на глубинах 50–60 и 80–100 км, и рудоконтролирующей структуре древнего фундамента Якутского литосферного корня.

Магнитоактивные зоны Гренландии. Глубинное строение литосферы Гренландии изучено очень слабо. Модели, основанные на сейсмических и геотермальных данных противоречивы. Стабильность ледникового щита Гренландии зависит от геотермального потока из глубин мантии. Однако традиционные измерения теплового потока практически отсутствуют [39, 40]. Предполагается, что большая часть Гренландии представляет собой древнюю платформу, а субширотные домены обусловлены мантией разного возраста, что объясняет зональность термической структуры литосферы (рис. 4). На юго-западе Гренландии расположен архейский кратон литосферы и протерозойские подвижные пояса.

В аномалиях *F*, *Z*-, *H*-компонент МПЗ, наблюдаемых в околоземном пространстве, выделяются две магнитоактивные зоны Гренландии — кратон на юге и магнитный блок фундамента на севере [40].

Расчет плотностного разреза по долготному сечению Гренландии (рис. 1, 4) позволяет предположить, что архейский кратон на юге Гренландии, характеризующийся толщиной до 200–270 км, создает значимый киль в литосфере. Возможно, он является литосферным корнем, аналогичным Ленскому корню в Восточной Сибири, который перекрывает мантийный тепловой поток и сохраняет тем самым стабильными зоны ледяного покрова многолетней мерзлоты. Изотерма 1300°C опускается здесь на глубину до 200 км, а изотерма Кюри допускает глубину намагниченных образований до 50 км, что тоже свидетельствует в пользу существования корня литосферы на юго-западе Гренландии.

На выходе термофлюидного канала на юге Гренландии внутри термических ареалов докембрийского фундамента сформирована минерогеническая зона и золоторудный узел. Основными факторами образования полезных ископаемых в горячих пятнах рудных узлов и минерогенических зон является вынос к поверхности рудоносных гидротермальных потоков минерализованных флюидов, поставляемых термофлюидными каналами из глубокофокусных тектонических зон докембрия и мантийных линз флюидной системы, расположенных на глубинах 30–70 км [8, 38].

Глубинные разрезы Гренландии демонстрируют результаты флюидно-магматической проработки древних комплексов архейского кратона (рис. 4). Влияние эндогенного фактора сказывается на специфике месторождений благородных

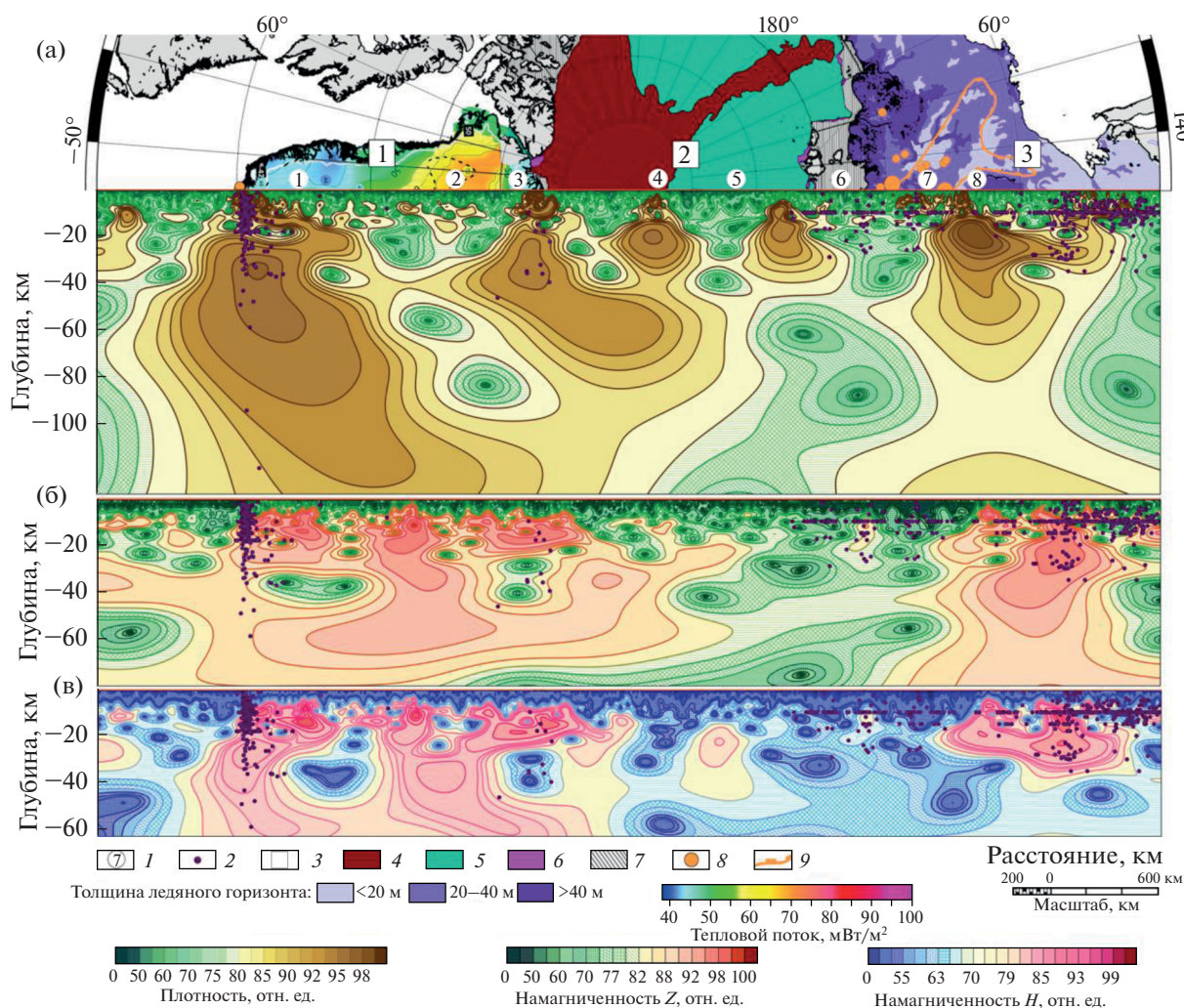


Рис. 4. Разрезы литосферы Арктики по профилю 4–4' (Гренландия–СЛО–Восточная Сибирь): (а) – плотностной разрез; (б) – магнитный разрез по аномалиям Z -; (в) – магнитный разрез по аномалиям H -. 1 – физико-географические элементы: Гренландия: 1 – кратон; 2 – СЗ-ЮВ пояс; 3 – северо-гренландский складчатый пояс. СЛО: 4 – хр. Ломоносова; 5 – Евразийский бассейн; 6 – море Лаптевых. В. Сибирь: 7 – Верхоянская астенотинза; 8 – Якутский литосферный корень. 2 – землетрясения; 3: 1 – тепловой поток Гренландии; 2 – ледовое покрытие СЛО (март 2019); 3 – толщина ледяного горизонта [35]. 4 – старый лед; 5 – однолетний лед (30–200 см); 6 – молодой лед; 7 – припай; 8 – месторождения (Au) [36]; 9 – золотоносная провинция.

металлов и др. в южной части кратона, куда выходит термофлюидный канал, подпитываемый линзами флюидной системы с глубины 30–70 км. Геотермальная проработка пород прослеживается вплоть до зоны инверсии скорости на глубине около 100 км [27], что подчеркивает гидротермальный генезис золоторудных объектов (рис. 4а).

На севере Гренландии широтные и долготный плотностные разрезы магнитного блока свидетельствуют о совсем другой природе магнитных образований. Она имеет сходство с магнитоактивной зоной СЛО на подводном подножии хребта Альфа. Аналогично хребту Альфа, северный магнитный блок, расположенный в центральной части острова, размещен в верхней части крупной субвертикальной разломной зо-

ны, прослеживающейся с глубины 80 км. Магнитные разрезы демонстрируют, что разломная зона заполнена магнитными образованиями, намагниченными вертикально и горизонтально (рис. 4б, 4в). Подошва намагниченных образований в разломной зоне опускается до 40–45 км, что согласуется с данными поверхности Кюри о температуре пород меньше 560°C на глубине около 50 км [24, 25, 39].

Анализ широтных плотностных разрезов показал, что западный и восточный борта разломной зоны образованы плотными блоками мощностью более 100 км. Глубина изотермы 1300°C допускает пологий скос плотностных неоднородностей литосферы с юго-запада Гренландии до глубины около 170 км.

По геотермальной модели массивный архейский кратон литосферы на юго-западе Гренландии характеризуется небольшим тепловым потоком ~ 40 мВт/м². Северо-центральную Гренландию пересекает пояс СЗ–ЮВ простирающийся с аномально тонкой (100–120 км) литосферой. Геотермальная модель на западе пояса дает тепловой поток 60–70 мВт/м². На востоке пояс сливается с зоной мощной аномалии теплового потока > 100 мВт/м² [39].

Долготный плотностной разрез свидетельствует о том, что повышенный тепловой поток пояса СЗ–ЮВ приурочен к термофлюидному каналу разломной зоны, прослеживающейся с глубины ~ 40 км (рис. 4). Питающие канал линзы флюидной системы мантии выделены на глубинах 60 и 100 км. Плотностные разрезы по широтным сечениям показывают, что мощная аномалия теплового потока на восточном побережье приурочена к литосферному элементу в виде верхнемантийной линзы, расположенной на глубине 90–100 км, от которой к поверхности восходит термальный поток флюидов по вертикальному каналу. Астенолинза простирается от 40° з.д. Гренландии до Исландско-Янмаенского хребта Гренландской котловины. Она находится в системе разломов СЗ–ЮВ пояса, которые вблизи 71° с.ш. сопровождаются эпицентрами землетрясений до глубин 10–48 км. Кроме того, благодаря пониженным магнитным свойствам глубокофокусная линза хорошо выражена в структуре магнитного поля на высотах 400–450 км, где она четко проявляется в виде региональных минимумов в *F* и *Z*-компоненте МПЗ от 40° з.д. до Исландско-Янмаенского хребта (рис. 1, 2, 4).

Тектоно-магматические процессы в центральной-восточной Гренландии способствуют таянию ледникового покрова. Тенденция глобального потепления повысила заинтересованность к судьбе ледяных щитов в Антарктиде и Гренландии, которые размываются как с поверхности, так и из глубины земной коры и мантии под действием геотермального теплового потока.

В Центральной Гренландии на северо-востоке и в центральной зоне (50°–40° з.д.) возможна локализация ускоренной деградации мерзлоты в виде сквозных таликов. Талики обусловлены направленным действием эндогенных термальных потоков вблизи выходов флюидно-магматических каналов, питающихся с глубины 60–70 км из линз флюидной системы. Флюидонасыщенный слой выделен по широтным плотностным разрезам не только на краях, но и в центре ледяной шапки. Сквозные талики эндогенного происхождения могут создавать негативные последствия в виде разрушения многолетнего льда.

Аномалии температуры литосферы являются существенным параметром для оценки сценариев таяния ледникового покрова. Однако традицион-

ные измерения теплового потока в Гренландии практически отсутствуют, а оценки по геофизическим моделям [41–43] противоречивы и пока не позволяют создать модель динамики ледникового покрова Гренландии. Исследователи поражены ускорением таяния и опасаются за будущее городов на побережьях по всему миру.

Рассмотренная технология выявления траекторий термофлюидных каналов и линз флюидных систем позволяют делать прогноз локализации ускоренной деструкции ледяного покрова Гренландии.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ АНТАРКТИКИ

Ледниковые многолетнемерзлые отложения Антарктиды являются одними из самых древних на Земле (https://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_57045). По мерзлым толщам определен возраст вечной мерзлоты Антарктиды.

Шельфовые ледники играют роль буфера, который препятствует попаданию огромных масс льда в океан. Однако исследователи считают, что шельфовые ледники Ларсен С, Шеклтон, Пайн-Айленд и Уилкинс находятся под угрозой разрушения из-за возможного глобального потепления климата [44].

Опыт изучения деструкции многолетних льдов в СЛО показывает [19, 28, 29], что, помимо климатических рисков, шельфовые ледники могут разрушаться под воздействием глубинного фактора — флюидных каналов разломных зон мантийного заложения. Специфические особенности зон таяния многолетнего льда могут возникать под влиянием направленного действия тепловых потоков, восходящих по термофлюидным каналам с глубины ~ 50 –100 км. Комплексные исследования строения литосферы позволяют найти возможные районы разрушения льдов многолетней мерзлоты и сделать прогноз наиболее вероятных зон деградации шельфовых ледников под действием причин глубинного характера.

Для оценки возможного влияния эндогенных факторов в Антарктике необходимо решение следующих задач:

- исследование глубинных неоднородностей строения литосферы Антарктиды;
- выявление магнитоактивных зон и корней литосферы;
- визуализация термофлюидных каналов Антарктиды и ее шельфовых ледников.

Глубинное строение Антарктиды на сегодняшний день остается областью предположений, основанных, главным образом, на результатах изучения региональных геофизических полей [44–49]. Основная цель исследования — получение представлений о неоднородностях земной коры Антарктиды на основе глубинных разрезов,

построенных по аномалиям компонент геомагнитного поля и аномалиям силы тяжести.

Геодинамические режимы становления земной коры Антарктиды и процессы тектонотермальной переработки отражаются в особенностях плотностного и магнитных разрезов. Наиболее ярко каналы термальной проработки проявляются на магнитных разрезах. Однако плотностной разрез подчеркивает слоистость и раздробленность земной коры, траекторию и районы выхода термофлюидных каналов, влияющих на толщину ледникового покрова. Плотностные глубинные разрезы литосферы дают возможность выявить местоположение линз флюидонасыщенных слоев. При наличии сейсмического события в линзах флюидных систем возникают пульсирующие колебания, провоцирующие активность вертикальной миграции потоков флюидов по термофлюидным каналам. Это приводит к увеличению интенсивности термального потока в зонах выхода к поверхности.

Литосфера магнитоактивных зон Антарктиды. Для выявления особенностей глубинного строения Антарктиды и природы магнитоактивных горизонтов, аномалии которых наблюдаются в околоземном пространстве, использованы аномалии компонент МПЗ вблизи земной поверхности и на высотах полета спутников. Вдоль трасс орбит КА *Swarm* построены плотностные и магнитные разрезы по аномалиям силы тяжести и приземным магнитным аномалиям компонент (рис. 1г, 5, 6).

На высоте полета спутников *CHAMP* и *Swarm* выявлены наиболее магнитоактивные зоны. В Западной Антарктиде интенсивные аномалии модуля приурочены к платобазальтам Земли Мэри Бэрд (15), в Восточной Антарктиде – к Западной (11) и Восточной (13) равнинам, к блокам фундамента докембрийского возраста – кратонам Шеклтона и Принс-Чарльза, кратону Земли Эндерби (9), кратону Вестфолл (12) Земли принцессы Елизаветы и кратону Адели (17) Земли Уилкса (16) (рис. 1г) [46, 47].

Протяженные разрезы по профилю 5–5' (рис. 1г, 5) позволили провести сравнительный анализ литосферы Западной и Восточной Антарктиды и получить представление о строении их магнитоактивных зон. Выявление ареалов выхода к поверхности термофлюидных каналов предоставило возможность оценить дополнительный вклад явлений эндогенного характера в разрушение ледникового покрова.

На основе данных о глубине залегания поверхностей изотермы 1300°C и Кюри [24] с учетом глобальной модели зон инверсии скорости [27] по глубинным разрезам получено представление о распределении плотностных и магнитных неоднородностей в земной коре и мантии Антарктиды (рис. 5а, 5в).

На разрезах профиля 5–5' (рис. 5б, 5в) видно, что у побережья Западной Антарктиды в бассейне моря Беллинсгаузена произошло погружение намагниченных пород океанической плиты юго-восточной части Тихого океана в зону палеосубдукции до глубины 25–30 км [47]. Зона палеосубдукции четко отражена на магнитных разрезах по аномалиям *Z*- и *H*-компонент и на плотностном разрезе в виде вертикального блока, просматривающегося до 30–35 км.

Процесс тектонотермальной переработки террейна гор Элсуэрта, имеющего докембрийский фундамент, возможен под влиянием флюидного канала, глубина залегания которого выявлена на плотностном и магнитных разрезах на уровне 20–35 км (рис. 5а–5в).

К поверхности фундамента массива Винсона и Трансантарктических гор выходит мощный вертикальный термофлюидный канал. Система Трансантарктических гор могла возникнуть на коре континентального типа как пассивная окраина древнего Восточно-Антарктического континента [49]. Глубинные разрезы содержат отчетливые признаки переработки древнего основания. Флюидонасыщенная линза, питающая термофлюидный канал, проявляется в мантии на глубине ~60 км (рис. 5а, 5б).

Исследование показывает, что термофлюидные каналы глубинных разломов, выходящие к поверхности дна, вносят существенный вклад в процесс разрушения многолетних льдов. Пути миграции флюидных потоков демонстрируют зоны глубинных геодинамических процессов, действующих в настоящее время. Воздействие термальных потоков гор Элсуэрта, массива Винсона и Трансантарктических гор наглядно выражено в виде небольших значений толщины ледового покрова (рис. 5б).

В районе гор Гамбурцева проявляется термальная проработка меньшего масштаба. Вертикальная часть термофлюидного канала начинается с глубины 15–20 км, а линза флюидонасыщенного слоя проявлена в земной коре на глубине 25–30 км (рис. 5). Температура потока флюидов, влияющая на скорость разрушения льда, зависит от глубины залегания канала и подпитывающей линзы флюидного слоя [8]. Тем не менее, тепловой поток нарушил целостность ледового покрова в районе гор Гамбурцева [50–52].

Западная граница Восточной Антарктиды уверенно прорисовывается по аномалиям *F* и *Z*- на высоте полета КА *CHAMP* и *Swarm*, начиная с Западной и Восточной равнин (рис. 1г). Докембрийская континентальная кора Восточной Антарктиды отделена от сложной геолого-тектонической структуры Западной Антарктиды Трансантарктическими горами (рис. 5–7). Древний кратон Восточной Антарктиды ярко выражен на всех глубинных разре-

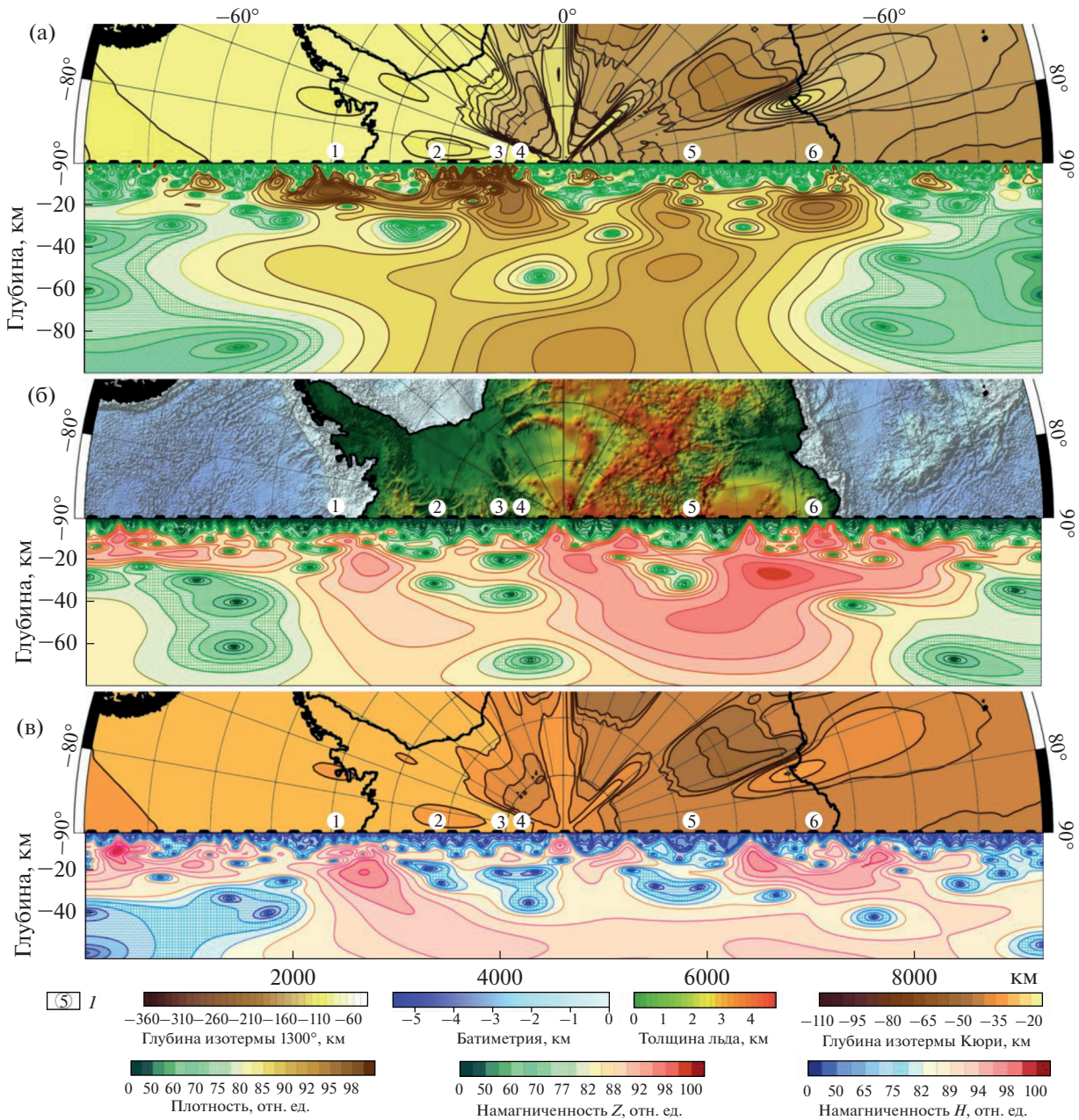


Рис. 5. Антарктика. Разрез литосферы по профилю 5–5' (Земля Элсуэрта–Земля Принцессы Елизаветы). (а) – плотностной разрез, подоснова – глубина изотермы 1300°С [24]; (б) – магнитный разрез по аномалиям Z, подоснова – толщина льда Антарктиды [50]; (в) – магнитный разрез по аномалиям H-, подоснова – глубина изотермы Кюри [24]. 1 – физико-географические элементы: 1 – Море Беллинсгаузена; 2 – горы Элсуэрта; 3 – массив Винсон; 4 – Трансантарктические горы; 5 – Горы Гамбурцева; 6 – кратон Вестфолл (Земля Принцессы Елизаветы).

зах. Он проявляется в виде плотных и массивных слоев в интервале глубин 20–40 км. Докембрийский фундамент по профилю 5–5' осложнен литосферными килами, прослеживающимися в плотностном разрезе до глубины более 100 км (рис. 5а). Фундамент Восточной Антарктиды хорошо виден от Трансантарктических гор до кратона Вестфолл на восточном побережье Земли Принцессы Елизаветы, кратона Эндерби и Земли Уилкса как

на магнитных разрезах по аномалиям F и компонент, так и на плотностных разрезах (рис. 5–7).

Глубинные разрезы по профилю 6–6' (рис. 1г, б) продемонстрировали плотностные и магнитные свойства магнитоактивных зон Антарктиды, магнитные аномалии которых наблюдаются на околоземной высоте (рис. 1г). Земная кора Восточной Антарктиды на этом профиле не осложнена килем. Однако в магнитных и в плотностном раз-

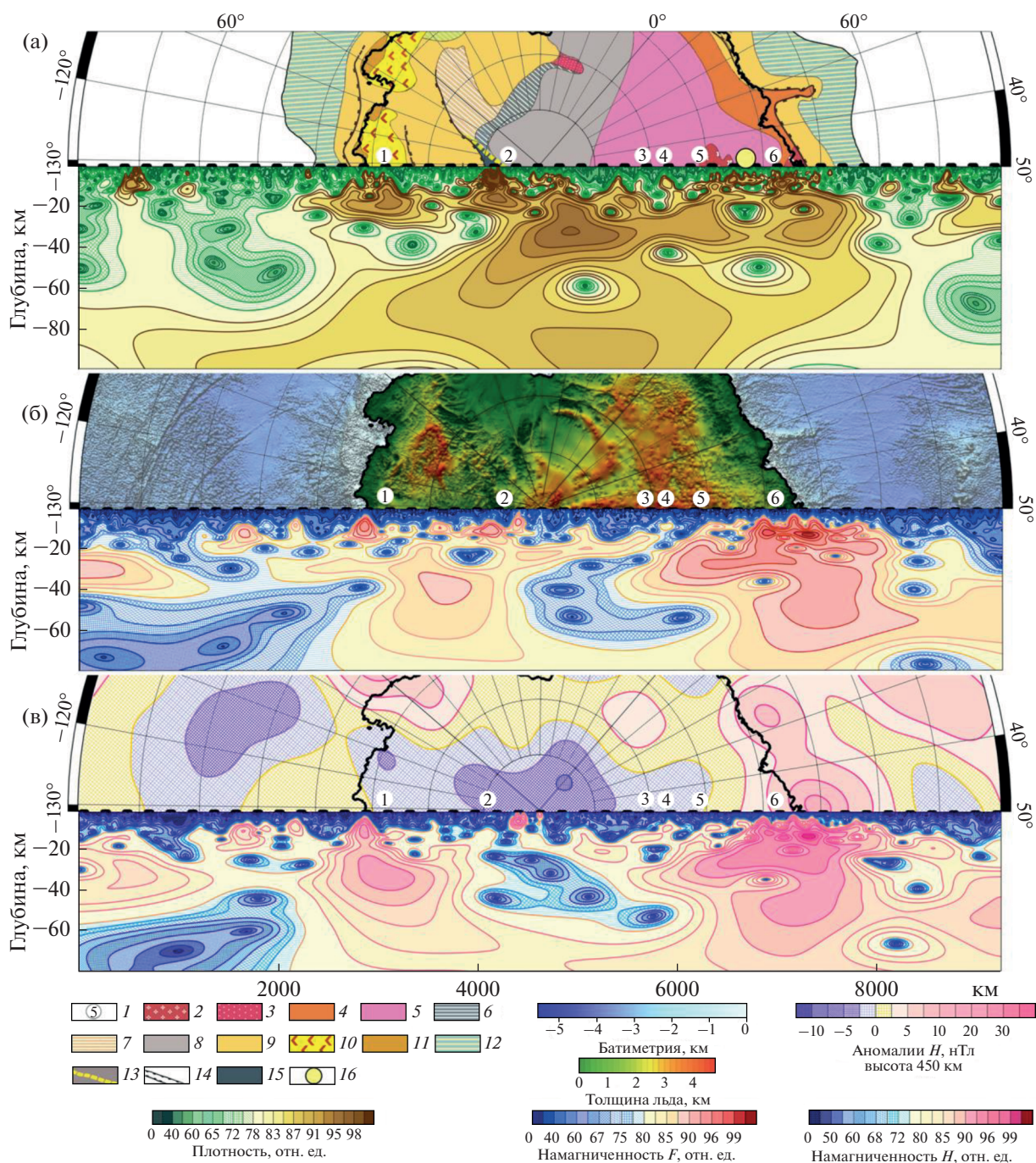


Рис. 6. Антарктика. Разрез литосферы по профилю 6–6' (Земля Мэри Берд–Земля Эндерби): (а) – плотностной разрез, подоснова – тектоническая карта Антарктиды [47]; (б) – магнитный разрез по аномалиям F , подоснова – толщина льда Антарктиды [50]; (в) – магнитный разрез по аномалиям H -, подоснова – карта аномалий на высоте 450 км. 1 – физико-географические элементы: 1 – Земля Мэри Берд; 2 – Трансантарктические горы; 3 – Горы Гамбурцева; 4 – Горы Вернадского; 5 – кратон Принца Чарльза; 6 – кратон Земли Эндерби. Массивы: 2 – архейские; 3 – протерозойские; 4 – мезопротерозойский подвижный пояс; 5 – докембрийские массивы. Зоны дислокаций: 6 – раннепалеозойские; 7 – позднепалеозойские; 8 – раннемезозойские платформы; 9 – осадочные бассейны; 10 – платобазальты; 11 – ороген Амундсена; 12 – океанические осадочные области; 13 – границы орогена Росса; 14 – разломы; 15 – ороген Росса; 16 – Au [46].

резах ярко отражен сложный характер блоков древнего фундамента со следами мощной тектономагматической переработки, начиная от Трансантарктических гор до кратона Земли Эндерби.

Комплексный анализ протяженных профилей позволил определить свойства неоднородностей земной коры Западной и Восточной Антарктиды и подойти к решению вопроса о плотностных

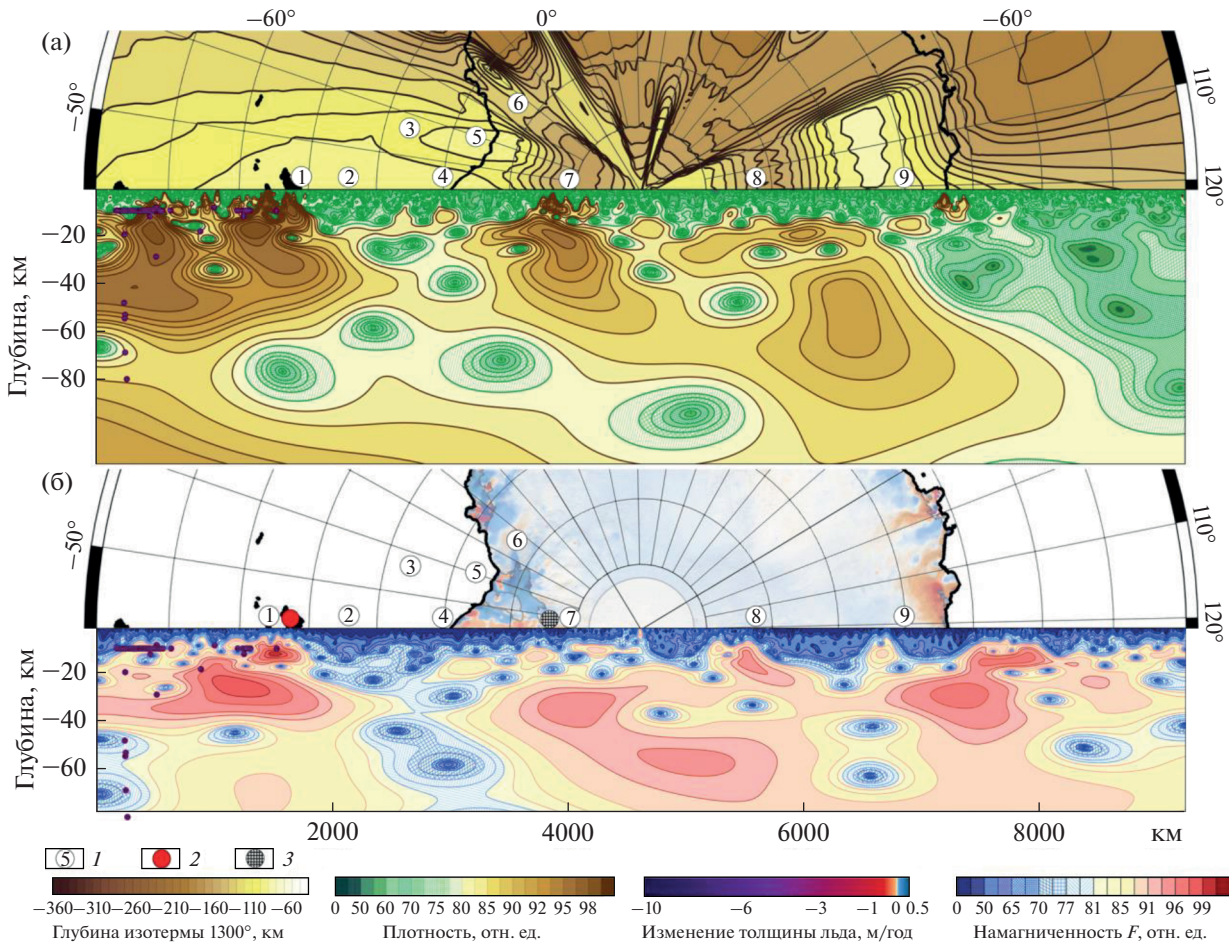


Рис. 7. Антарктика. Разрез литосферы по профилю 7–7' (Море Уэдделла–Земля Уилкса): (а) – плотностной разрез, подоснова – глубина изотермы 1300°С [24]; (б) – магнитный разрез по аномалиям F , подоснова изменение толщины льда [https://scitechdaily.com]; 1 – физико-географические элементы: 1 – Антарктический п-в; 2 – шельфовый ледник Ларсен-С; 3 – Море Уэдделла; 4 – шельфовый ледник Ронне; 5 – шельфовый ледник Филхнера; 6 – кратон Земли Коутса; 7 – Горы Пенсакола; 8 – Восточная равнина; 9 – Земля Уилкса. 2 – месторождение благородных металлов [46]; 3 – месторождение черных металлов [46].

свойствах и характере намагниченности источников магнитных аномалий, отражающих физическое состояние древних блоков Антарктиды.

На основе векторной модели южной полярной шапки впервые выделены аномалии H -компоненты некоторых блоков древнего фундамента, проявившихся в аномалиях модуля на высоте спутников: Земли Эндерби, кратонов Шеклтон, Земли Адели, Уилкса, Элсуерта. Однако аномалии H -компоненты на высоте 450 км выявляют еще ряд древних зон. Например, зону палеосубдукции и районы в море Уэдделла на шельфе Антарктического полуострова и в море Амундсена на шельфе Земли Мэри Берд. Кроме того, на кратоне Земли Коутса, находящегося на юго-западе древней Земли Королевы Мод, расположена крупная аномалия H -компоненты, что представляется одним из ключевых факторов при реконструкции суперконтинента Родинии [53].

В фундаменте Антарктиды залегает докембрийская земная кора. Глубинные разрезы, построенные по приземным магнитным аномалиям, позволили уточнить внутреннее строение магнитоактивных зон земной коры Антарктиды. На магнитных разрезах ярко выделяются горизонты магнетитовой зоны докембрийского фундамента, например, Земли Эндерби, аномалии которой наблюдаются по измерениям КА *CHAMP* и *Swarm*. Такие блоки устойчивых областей докембрийской коры Антарктиды, обогащенные минералами железа, создают горизонты магнетитовых зон, которые могут являться источниками формирования месторождений джеспилитов [9, 37].

Кроме того, исследование зоны многолетней мерзлоты в Восточной Сибири выявило [31], что в докембрийских блоках фундамента под влиянием выходов к поверхности термофлюидных каналов возникают термические ареалы таяния –

сквозные талики, представляющие собой очаги рудных узлов гидротермальных месторождений. Термальный поток вблизи древнего кратона Принса Чарльза отражается не только в разрушении ледового покрова, но и возможного образования сквозного талика с золоторудной минерализацией (рис. 6а) [46].

Крупная зона субвертикального термофлюидного канала выходит к поверхности вблизи древнего архейского кратона Принс-Чарльз (рис. 6б), образующая термический ареал. Сквозной талик гор Принс-Чарльз содержит проявления золота и металлов платиновой группы, железистых кварцитов, уран-ториевой минерализации, единичные обломки алмазных кристаллов и минералы — спутники алмаза [46].

Мощная зона мантийной гидротермальной проработки видна в Западной Антарктиде на плато базальтов и террейна на Земле Мэри Бэрд. Там выявлены радиометрические аномалии [46].

С докембрийскими образованиями связано возникновение значительной части полезных ископаемых. Исследование глубинного строения древних геоблоков дает возможность выявлять области, перспективные на рудные и алмазоносные полезные ископаемые [8, 11, 31, 37, 38]. Магнитоактивные зоны геоблоков докембрия представляют особый интерес для решения поисковых геолого-геофизических задач.

Факторы разрушения ледового покрытия Антарктиды и шельфовых ледников эндогенного характера. Анализ зоны вечной мерзлоты в Арктике показал, что в древних докембрийских блоках с утолщенной литосферой существуют области со стабильной толщиной многолетнего ледового покрытия [31]. Карты глубин изотермы Кюри и 1300°C подтверждают наличие мощной литосферы в докембрийской платформе Восточной Антарктиды. Это позволяет предположить, что, несмотря на наличие вертикальных термофлюидных каналов проработки древнего фундамента, кили литосферы могут обеспечить стабильность ледового покрытия. Совместный анализ ледового щита Антарктиды и плотностных разрезов подчеркивает зависимость толщины льда от мощности плотных слоев, перекрывающих мантийное тепло (рис. 5, 6). Масштаб разрушения ледяного покрова под влиянием эндогенного фактора может быть оценен исходя из глубины залегания канала гидротермальной проработки.

Проведенное исследование позволяет понять возможные эндогенные причины разрушения ледового покрытия в зоне многолетней мерзлоты и дать прогноз расположения наиболее вероятных районов ускоренной деградации ледников в Антарктиде (рис. 5б, 6б, 7).

Восточно-антарктический ледяной щит выходит в море Уэдделла через ледяную окраину Зем-

ли Коутса. Ледники и ледяные потоки Коутса слились с ледниковым потоком Палео-Фильхнера во время последнего наступления ледников, что способствовало значительному продвижению льда по желобу Фильхнера. Предполагается, что пространство, покрытое шельфовыми ледниками Фильхнера и Ронне, подстилается континентальной корой с докембрийским фундаментом, перекрытым деформированными комплексами палеозоя и истончившимся в процессе рифтинга [45]. Кроме того, наши исследования показали, что в желоб Фильхнера с глубины 40 км выходит вертикальный термофлюидный канал, подпитываемый мантийной линзой с 60–70 км. В результате выхода теплового потока ко дну моря лед становится тонким и происходит потеря связи между шельфовыми ледниками и дном, что оказывает значительное влияние на устойчивость шельфового ледника Фильхнера—Ронне [53–58].

Исследование местоположения выходов термофлюидных каналов к поверхности шельфовых ледников показало, что в зоне наибольшего риска эндогенного характера находятся ледники Фильхнера—Ронне и Ларсена-С. Эти ледники расположены в районе выхода мощного вертикального термального канала, прослеживающегося с глубины 30 км (рис. 7). Подпитывающие канал мантийные флюидонасыщенные линзы являются звеньями крупной Западно-Антарктической рифтовой системы морей Уэдделла (10) и Росса (18) (рис. 1г) [45]. Линзы расположены на глубинах 50–80 км и аналогичны астенотинзам Восточной Сибири и Гренландии (рис. 1).

На глубинном разрезе, пересекающем Западно-Антарктический рифт вкрест простирания, ярко проявляется сильнейший процесс вертикальной тектонотермальной проработки в интервале глубин 30–80 км (рис. 6б, 6в). Вероятнее всего, этот процесс вызван вертикальным каналом, который может быть активизирован потоком из флюидных линз рифтовой системы. Флюидонасыщенный слой рифта хорошо виден на плотностном разрезе (рис. 7а) и отражается в аномалиях МПЗ на высоте 450 км в виде минимума F , проходящего по линии море Уэдделла — море Росса (рис. 1г).

Ледник Росса находится в более стабильной термальной зоне, так как вертикальный канал наблюдается всего с глубины 15 км при глубине залегания подпитывающей линзы 30–70 км.

Визуализация разрезов позволила выявить источники магнитных аномалий, наблюдаемых на околоземных высотах, и определить местоположение каналов глубинного заложения. Выявление траекторий термофлюидных каналов и линз флюидных систем позволяет делать прогноз эндогенных причин ускоренной деградации льдов Антарктиды и шельфовых ледников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По измерениям, выполненным КА *CHAMP* и *Swarm*, верифицирована векторная модель геомагнитного поля полярных областей Земли. Модель дает возможность создавать цифровые магнитные карты элементов МПЗ для разных уровней высот в околоземном пространстве до 600 км.

Актуализация картографической векторной модели МПЗ представляют интерес для региональных геолого-геофизических исследований, тектонического районирования и изучения глубинного строения земной коры континентов и океанов. Интерпретация аномалий компонент МПЗ придает новый импульс неотектоническим и геодинамическим идеям пространственно-временных реконструкций. Карты компонент МПЗ имеют научное и прикладное значение для решения геолого-геофизических и поисково-разведочных задач труднодоступных полярных областей Земли.

Проведено исследование глубинного строения Арктики и Антарктики. На основе интерпретации аномалий силы тяжести, компонент аномалий геомагнитного поля и сейсмологических данных построены протяженные глубинные разрезы через основные тектонические структуры СЛО, Восточной Сибири, Гренландии и Антарктиды. На плотностных и магнитных разрезах визуализированы пути миграции мантийных флюидных потоков в виде каналов с пониженными магнитными и плотностными свойствами.

Результаты совместного анализа глубинных разрезов со спутниковыми данными изменений ледового покрова полярных областей Земли показали, что существенную роль в процессе деградации льда играют вертикальные термофлюидные каналы.

Рассмотрены примеры термических ареалов сквозных таликов, возникших под влиянием тепловых потоков термофлюидных каналов в древних блоках земной коры Восточной Сибири, Гренландии и Антарктиды. Ареалы таяния представляют собой рудные узлы, в пределах которых сконцентрированы месторождения полезных ископаемых под воздействием гидротермальных потоков минерализованных флюидов.

Исследования показали, что стабильность горизонтов многолетней мерзлоты обеспечивается холодными блоками корней литосферы, перекрывающими тепло мантии в Восточной Сибири, и, возможно, в зонах килей Гренландии и Антарктиды.

Проведенный анализ позволяет понять возможные причины разрушения ледовых щитов Гренландии и Антарктиды и дать прогноз эндогенных причин наиболее вероятных районов ускоренной деградации льдов и шельфовых ледников.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № 16.5 “Исследование физической природы пространственно-временных изменений магнитного поля Земли и солнечно-земных связей” и государственной программы РФ “Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации” (Указ Президента РФ от 05.03.2020 г. № 164).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *Brown W., Beggan C., Cox G., Macmillan S.* The new WMM2020 and IGRF-13 models, and a retrospective analysis of IGRF secular variation // *The EGU General Assembly*. 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9775>
5. *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. Id. 126. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0510-5>
6. *Петрова А.А.* Методика спектрально-корреляционного анализа аномального геомагнитного поля. Автореф. дис. канд. ф.-м. наук. М.: ИЗМИРАН, 1976.
7. *Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Геотермальные зоны юга Восточной Сибири // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2019. Вып. 42. № 2. С. 25–41.
8. *Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны Северного Забайкалья // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2019. Вып. 41. № 1. С. 37–53.
9. *Petrova A.A., Kopytenko Y.A., Petrishchev M.S.* Deep fluid systems of Fennoscandia greenstone belts // *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*. 2019. P. 239–247.
10. *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.
11. *Петрова А.А., Латышева О.В.* Верификация модели аномалий компонент магнитного поля Арктики // *Материалы Всероссийской конференции “Глобальные проблемы Арктики и Антарктики”*. ФИЦКИА РАН. Архангельск. 2020. С. 279–284.
12. *Kopytenko Yu.A., Petrova A.A., Guriev I.S. et al.* Analysis of the Informativity of the Earth’s Magnetic Field in near-Earth Space // *Cosmic Research*. 2021. V. 59. № 3. P. 143–156.

13. *Петрова А.А., Мавричев В.Г.* Геомагнитный метод прогноза коренных месторождений алмазов на примере Красновишерского района. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004.
14. *Lyukianova L., Petrova A.* Geomagnetic method of primary diamond deposits prediction exemplified by the Western Urals // Proc. of EGU General Assembly, Vienna. 2014. Id. EGU2014-4086.
15. *Larochkina I.A.* Rational techniques for oil exploration // Georesources. 2008. V. 27. № 4. P. 1–18.
16. *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. 1–23. http://rogov.zwz.ru/Marine%20geology%202009_t_2.pdf
17. *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 ICAM, Trondheim, Norway, 2011. P. 523–529.
18. *Харахинов В.В., Шленкин С.И., Зеренинов В.А. и др.* Нефтегазоносность докембрийских толщ Куymbинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазонакопления // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 1.
19. *Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Природные явления эндогенного происхождения в Арктическом бассейне // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. Вып. 48. № 4. С. 37–53.
20. *Шипилов Э.В.* Базальтоидный магматизм и сдвигающая тектоника Арктической континентальной окраины Евразии в приложении к начальному этапу геодинамической эволюции Американо-Азиатского бассейна // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 12. С. 2115–2142.
21. *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.
22. *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. Id. EGU2013-2578.
23. *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, Tromsø. 2014. Is. 2. P. 31–34.
24. *Artemieva I.M.* Global $1^\circ \times 1^\circ$ thermal model TC1 for the continental lithosphere: implications for lithosphere secular evolution // Tectonophysics. 2006. V. 416. P. 245–277.
25. *Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R.* Heat flow from the Earth’s interior: analysis of the global data set // Rev. Geophysics. 1993. V. 31. P. 267–280.
26. *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.
27. *Simmons N.A., Forte A.M., Boschi L., Grand S.P.* GyP-SuM: A joint tomographic model of mantle density and seismic wave speeds // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. B12310.
28. *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.
29. *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.
30. *Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Опасные природные явления эндогенного характера в Арктической зоне Российской Федерации // Материалы Всероссийской конференции “Глобальные проблемы Арктики и Антарктики”. ФИЦКИА РАН. Архангельск. 2020. С. 815–820.
31. *Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А.* Специфика литосферы зоны многолетней мерзлоты Восточной Сибири // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. Вып. 49. № 1. 2021. С. 36–52.
32. *Старостин В.И., Избеков Э.Д., Разин Л.В., Сакия Д.Р.* Перспективы обнаружения крупных и уникальных месторождений благородных металлов на Северо-Востоке Сибирской платформы // Вестн. Моск. ун-та. Геология. 2016. № 2. С. 34–43.
33. *Стогний Г.А., Стогний В.В.* Структура юго-восточного обрамления Северо-Азиатского кратона // Тектоника коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых. Материалы XXXVIII Тектонического совещания. 2005. Т. 2. С. 238–241.
34. *Iosifidi A.G., Khramov A.N.* Paleomagnetism of paleozoic sediments from the Kozhim River section: On the problem of palinspastic reconstructions of the Subpolar Urals and Pai-Khoi // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2013. V. 49. № 1. P. 63–76.
35. *Stolbovoi V., McCallum I.* CD-ROM “Land Resources of Russia”, International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science. Laxenburg. Austria. 2002.
36. *Волков А.В., Галямов А.Л., Лобанов К.В.* Минеральное богатство циркумарктического пояса // Арктика: экология и экономика. 2019. № 1. С. 106–117.
37. *Наливкина Э.Б.* Эволюция раннедокембрийской земной коры. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004.
38. *Наливкина Э.Б., Петрова А.А.* Магнетитовая зона земной коры континентов. СПб.: ВСЕГЕИ, 2018.
39. *Artemieva I.* Lithosphere thermal thickness and geothermal heat flux in Greenland from a new thermal isostasy method // Earth-Science Reviews. 2019. V. 188. P. 469–481.
40. *Бертельсен А., Нью-Нюгорд А.* Докембрий Гренландии // Науки о Земле. Фундаментальные труды зарубежных ученых по геологии, геофизике и геохимии. Докембрий Канады, Гренландии, Британских островов и Шпицбергена. 1968. С. 107–235.
41. *Fahnestock M., Abdalati W., Joughin I. et al.* High geothermal heat flow, basal melt, and the origin of rapid ice

- flow in central Greenland // *Science*. 2001. V. 294. P. 2338–2342.
42. Rogozhina I., Petrunin A.G., Vaughan A.P. et al. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history // *Nature Geosci.* 2016. V. 9. P. 366–369.
43. Van der Veen C.J., Leftwich T., von Frese R. et al. Subglacial topography and geothermal heat flux: potential interactions with drainage of the Greenland ice sheet // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. Is. 12. Id. L12501.
44. Gilbert E., Kittel C. Surface Melt and Runoff on Antarctic Ice Shelves at 1.5°C, 2°C, and 4°C of Future Warming // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. Is. 8. Id. e2020GL091733.
<https://doi.org/10.1029/2020GL091733>
45. Хаин В.Е. Региональная тектоника. Северная и Южная Америка, Антарктида и Африка. М.: Недра, 1971.
46. Грикуров Г.Э., Лейченко Г.Л., Михальский Е.В. и др. Минеральные ресурсы Антарктики: геологические предпосылки и перспективы освоения // *Разведка и охрана недр*. 2000. № 12. С. 59–63.
47. Grikurov G., Leychenkov G. Tectonic Map of Antarctica. Scale: 1 : 10000000. Commission for the geological map of the world, 2012.
48. Ласточкин А.Н. Морфотектоническое районирование Антарктики. I. Теоретическое обоснование // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2006. Т. 7. Вып. 1. С. 30–57.
49. Baranov A., Tenzer R., Bagherbandi M. Combined Gravimetric-Seismic Crustal Model for Antarctica // *Surveys in Geophysics*. 2018. V. 39. Is. 1. P. 23–56.
50. Fretwell P.T., Pritchard H., Vaughan D. Bedmap2: Improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *The Cryosphere*. 2013. Is. 7. P. 375–393.
51. Shen W., Wiens D., Lloyd A., Nyblade A. A Geothermal Heat Flux Map of Antarctica Empirically Constrained by Seismic Structure // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. Is. 14.
<https://doi.org/10.1029/2020gl086955>
52. Lösing M., Ebbing J., Szwillus W. Geothermal Heat Flux in Antarctica: Assessing Models and Observations by Bayesian Inversion // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 8. Id. 105.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.00105>
53. Mieth M., Jokat W. New aeromagnetic view of the geological fabric of southern Dronning Maud Land and Coats Land, East Antarctica // *Gondwana Research*. 2014. V. 25. Is. 1. P. 358–367.
54. Whitehouse P.L., Gomez N., King M.A., Wiens D.A. Solid Earth change and the evolution of the Antarctic Ice Sheet // *Nature Communications*. 2019. V. 10. Id. 503.
55. Rignot E., Jacobs S., Mouginot J., Scheuchl B. Ice-Shelf Melting Around Antarctica // *Science*. 2013. V. 341. Is. 6143. P. 266–270.
56. Smith B., Fricker H.A., Gardner A.S. et al. Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes // *Science*. 2020. V. 368. Is. 6496. P. 1239–1242.
57. Hodgson D.A., Hogan K., Smith J.M. et al. Deglaciation and future stability of the Coats Land ice margin, Antarctica // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. P. 2383–2399.
58. Slater T., Lawrence I.R., Otosaka I.N. et al. Earth's ice imbalance // *The Cryosphere*. 2021. V. 15. Is. 1. P. 233–246.