УДК 550.389; 550.382; 550.34; 551.345

DOI: 10.31431/1816-5524-2021-1-49-36-52

СПЕЦИФИКА ЛИТОСФЕРЫ ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© 2021 А.А. Петрова, О.В. Латышева, Ю.А. Копытенко

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

Представлены результаты исследования глубинного строения литосферы Восточной Сибири. На основе данных о толщине ледяного горизонта многолетней мерзлоты, аномалий силы тяжести, аномалий геомагнитного поля и сейсмологических данных получена модель строения литосферы областей со стабильной толщиной ледяного горизонта. Показано, что районы с большими значениями толщины ледяного горизонта тяготеют к участкам литосферы с мощными, имеющими повышенную плотность и намагниченность, корнями. Сделано предположение, что стабильность горизонтов многолетней мерзлоты обеспечивается холодными блоками корней литосферы, препятствующими поступлению тепла из мантии. Для поиска эндогенных причин климатических рисков в районах с ускоренной деградацией многолетней мерзлоты построены глубинные разрезы земной коры. Анализ данных о толщине ледяного горизонта совместно с глубинными разрезами показал, что определяющее влияние на процесс разрушения мерзлоты оказывают флюидные потоки, поднимающиеся с глубины ~50-100 км вдоль вертикальных разломных зон. Ускоренная деградация мерзлоты над флюидно-магматическими каналами приводит к появлению специфических зон таяния в виде сквозных таликов. Проведенные исследования позволяют понять возможные причины разрушения инфраструктуры в зоне мерзлоты и дать прогноз расположения наиболее вероятных районов ускоренной деградации.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, корни литосферы, сквозные талики, термофлюидные каналы.

введение

Целью работы является выявление специфики строения литосферы в зоне многолетней мерзлоты Восточной Сибири (рис. 1а). Исследование литосферы областей со стабильной толщиной ледяного горизонта (Stolbovoi, McCallum, 2002) и районов ускоренного таяния проведено на основе интерпретации аномалий модуля и компонент магнитного поля Земли (МПЗ) (Копытенко, Петрова, 2016, 2020б) с учетом аномалий силы тяжести (Bonvalot et al., 2012) и сейсмологических данных (International..., 2020). Для аномалий модуля и Z-компоненты МПЗ Восточной Сибири выполнена проверка модели (Петрова, Латышева, 2020) по измерениям космических аппаратов (КА) СНАМР и Swarm на высотах 400 и 450 км (Thebault et al., 2016) (рис. 1б).

Визуализация неоднородностей земной коры представлена на плотностных и магнитных

разрезах, полученных методом спектральнопространственного анализа аномальных полей с конвертацией в глубинные разрезы (Петрова, 1976, 1977; Петрова, и др., 2020а; Петрова, Карасик, 1979; Петрова, Колесова, 1986; Петрова, Копытенко, 20196; Petrova et al., 1992, 2019). Плотностные разрезы построены по аномалиям силы тяжести, магнитные — по аномалиям модуля (Т), вертикальной (Z) и горизонтальной (H) компонент МПЗ, рассчитанных по модели Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (Копытенко, Петрова, 2016, 2018, 2020а, 20206; Петрова, 2015; Петрова, Латышева, 2020).

Проведенное авторами статьи исследование причин разрушения многолетней мерзлоты выявило, что существенное влияние на деструкцию ледяного покрова оказывают разломы глубинного заложения, на выходе которых к



Рис. 1. Район исследований: *а* — топография (Amante, Eakins, 2009); *б* — аномалии Z-компоненты МПЗ, измеренные KA Swarm и CHAMP: *1* — изолинии аномалий Z, нТл (CHAMP, высота 400 км) (Thebault et al., 2016).

Fig. 1. The study area: a — topography (Amante, Eakins, 2009); δ — anomalies of the Z-component of the Earth's magnetic field, measured by the spacecrafts Swarm and CHAMP. 1 — isolines of Z anomalies, nT (CHAMP, altitude 400 km) (Thebault et al., 2016).

поверхности локализуются очаги оттаивания. Траектория флюидных каналов разломных нарушений четко прослеживается на разрезах в виде зон с пониженными плотностными и магнитными свойствами (Копытенко и др., 2020; Павленкова, 2013, 2018; Петрова, Копытенко, 2019а, 2019б; Petrova et al., 2019). Максимальный эффект таяния — сквозные талики. Они появляются под действием теплового потока восходящей миграции флюидов по вертикальным и субвертикальным разломам (Петрова и др. 2020а, 2020б; 2020в).

Исследование причин техногенных катастроф, произошедших в последнее время в зоне многолетней мерзлоты, показывает, что в процессе проектирования и эксплуатации газонефтяной, строительной, дорожной и др. инфраструктур существует недооценка роли эндогенного фактора в процессах деградации криолитозоны. В частности, вертикальная миграция термофлюидных потоков приводит к развитию коррозии трубопроводов, так как флюид — перемещающийся из мантии поток легких летучих химически активных соединений. Учитывая дестабилизирующие факторы, которые обуславливают развитие коррозии трубопроводов и емкостей для их хранения, в потенциально опасных зонах необходимо изготовление изделий на базе современных материалов нового поколения из композитных бетонов с наноструктурами.

С целью уменьшения рисков реализации экономических и инфраструктурных проектов в зоне многолетней мерзлоты РФ исследована возможность определения местоположений наиболее вероятных зон проявления опасных природных явлений глубинного характера. На основе полученных данных возможен прогноз локализации сквозных таликов эндогенного происхождения, причиняющих ущерб и создающих дополнительные риски в районах осуществления хозяйственно-экономической деятельности.

СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ОБЛАСТЕЙ СО СТАБИЛЬНОЙ ТОЛЩИНОЙ ЛЕДЯНОГО ГОРИЗОНТА МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

Глобальные изменения климата негативно влияют на состояние многолетней мерзлоты. Тем более актуальным представляется изучение особенностей глубинного строения областей стабильной многолетней мерзлоты, которая может обеспечить безопасность и прочность сооружений крупных производственных объектов и жилых зданий.

Стабильность вечной мерзлоты оценивается по термическим и временным критериям. Рассмотренный в настоящей статье долгоживущий слой вечномерзлой толщи — ледяной горизонт — расположен под верхним слоем активных сезонных изменений мерзлоты. Температура этого слоя остается постоянной в течение года (Конищев. 2009; Jansson, Tas, 2014; Shuur et al., 2005). Ледяной горизонт мерзлоты характеризуется стабильной во времени среднегодовой температурой пород t_{cp} : от -5°C до -10°÷-15°C (Jansson, Tas, 2014; Shuur et. al., 2005) и повышенной льдистостью (>40% от общего объема породы) (Хромова и др., 2015).

С целью изучения специфики глубинного строения многолетней мерзлоты проведен анализ магнитных и плотностных свойств литосферы. На основе аномалий силы тяжести и сейсмологических данных построены плотностные разрезы, выстроенные вертикально по меридианам (рис. 2) и горизонтально — по широтам (рис. 3). Стабильные области многолетней мерзлоты представляют интерес как наиболее надежные зоны для безопасного развития проектов на территории Арктической зоны РФ (АЗРФ), в том числе осуществления планов строительства инфраструктуры, ведения природопользования и хозяйственно-экономической деятельности.

Совместный анализ глубинных плотностных разрезов и карт ледяного горизонта многолетней мерзлоты (Петрова и др. 2020а; Stolbovoi, McCallum, 2002) показал, что зоны со стабильной толщиной ледяного горизонта приурочены к мощным корням литосферы (рис. 2*3*-*к*; рис. 3*г*-*е*).



Рис. 2. Зона многолетней мерзлоты Арктической зоны РФ: *а* — толщина ледяного горизонта; *б*–*л* — плотностные разрезы. *1* — положение профиля; *2* — граница Северного морского пути; *3* — землетрясения; *4* — мост (р. Кола); *5* — Ямальский кратер; *6* — аварийный резервуар под Норильском; *7* — ПАТЭС (Певек).

Fig. 2. Permafrost zone of the Russian Federation Arctic zone: a— the thickness of the ice horizon; $\delta - a$ — density sections. 1— profile position; 2— boundaries of the Northern Sea Route area; 3— earthquakes; 4— bridge (Kola river); 5— Yamal Crater; 6— emergency tank near Norilsk; 7— floating nuclear power station (Pevek).

СПЕЦИФИКА ЛИТОСФЕРЫ ЗОНЫ



Рис. 3. Арктическая зона РФ: *а* — среднегодовые температуры многолетнемерзлых пород; *б*–*ж* — плотностные разрезы, подоснова — минимумы плотности на глубине 20 км. Условные обозначения *1*–7 представлены на рис. 2.

Fig. 3. Russian Federation Arctic zone: a — average annual temperatures of permafrost; $\delta - \omega$ — density sections, background — density minima at a depth of 20 km. For symbols *1*–7 see Fig. 2.

Исследование корней литосферы Восточной Сибири позволило получить представление о специфике строения и природе стабильных областей многолетней мерзлоты и наметить районы с потенциально устойчивой мощностью ледяного горизонта. В результате интерпретации приземных аномалий модуля и компонент МПЗ, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных с учетом толщины ледяного горизонта многолетней мерзлоты РФ предложена модель строения литосферы областей со стабильной толщиной ледяного горизонта. Анализ глубинных разрезов выявил, что корни литосферы это мощные субвертикальные блоки повышенной плотности и намагниченности. Толщина плотностного блока корней может составлять более 100 км (рис. 2-5). Расчеты магнитных разрезов показали, что намагниченные блоки корней литосферы Восточной Сибири, создающие аномалии модуля, Z- и H-компонент МПЗ прослеживаются до глубины 40–60 км и более (рис. 4 e, 4 d, 4 x, 4 3; 5 δ , 5 e).

Рассмотрены два наиболее крупных известных корня литосферы Восточной Сибири — Ленский (ЛнЛК) и Якутский (ЯкЛК) (Старостин и др., 2016; Стогний, Стогний, 2005). Наши исследования показали, что вблизи поверхности Земли эти литосферные элементы создают региональные магнитные аномалии: по модулю, Zи Н-компонентам МПЗ интенсивностью до 500-600 нТл (Копытенко, Петрова, 2020а; Litvinova, Petrova, 2016, 2017). Физические условия в низах корней литосферы Восточной Сибири благоприятны для образования термоостаточной и индуктивной намагниченности (Artemieva, 2006). Однако аномальное поле Н-компоненты МПЗ, по всей вероятности, обусловлено преимущественно остаточной намагниченностью

ПЕТРОВА и др.



Рис. 4. Разрезы литосферы зон стабильного ледяного горизонта: *а* — тепловой поток; *б* — толщина ледяного горизонта. Разрез 1–1': *в* — плотностной, магнитные (*e* — по аномалиям Z-компоненты, *д* — по аномалиям H-компоненты). Разрез 2–2': *е* — плотностной, магнитные (*ж* — по аномалиям Z-компоненты, *з* — по аномалиям H-компоненты). *1* — положение профиля; *4* — кимберлиты; *5* — аварийный резервуар (Норильск); *6* — рудный узел — Ni. Условные обозначения 2–3 представлены на рис. 2.

Fig. 4. Sections of the lithosphere of stable ice horizon zones: a — heat flow; δ — the thickness of the ice horizon. Section 1–1': e — density, magnetic (e — for Z-component anomalies, ∂ — for H-component anomalies). Section 2–2': e — density, magnetic (\mathcal{H} — for Z-component anomalies, 3 — for H-component anomalies). 1 — profile position; 4 — kimberlites; 5 — emergency tank (Norilsk); 6 — ore cluster — Ni. For symbols 2–3 see Fig. 2.

пород, так как ЛнЛК расположен на линии продвижения магнитного полюса (МП), перемещающегося в направлении Мировой магнитной Сибирской аномалии, в зоне минимума главного поля Н-компоненты вектора индукции МПЗ (рис. 6) (Копытенко, Петрова, 20206; Kopytenko et al., 2019; Litvinova, Petrova, 2017). Поэтому большие значения аномалий Н-компоненты с амплитудами 500-600 нТл, вероятнее всего, вызваны термоостаточной намагниченностью пород, возникшей ранее. Возможно, что термоостаточная намагниченность могла сохраниться с древних времен, когда в Северном Ледовитом океане еще не было МП, а породы ЛнЛК образовались и намагнитились вблизи экваториальной зоны, где главное поле Н-компоненты имеет значения ~40000 нТл (Копытенко и др., 2021; Петрищев и др., 2019; Петрова и др., 20206; Iosifidi, Khramov, 2013).

В околоземном пространстве ЛнЛК и ЯкЛК зафиксированы в измерениях КА СНАМР и Swarm на высотах 400 и 450 км (рис. 16). Над ЛнЛК аномалии модуля и Z достигают амплитуды 10–15 нТл, над ЯкЛК — 5–6 нТл (Thebault et al., 2016). Аномалии H в околоземном про-

странстве ЛнЛК создает с амплитудой до 6 нТл, ЯкЛК — до 4 нТл (Копытенко, Петрова, 2020а; Копытенко и др., 2021). Магнитные аномалии корней литосферы, рассчитанные по модели для высоты измерений КА (Копытенко, Петрова, 2020а, 2020б), подтверждены измерениями модуля МПЗ и Z-компоненты КА СНАМР и Swarm (Thebault et al., 2016). Расхождения аномалий литосферных корней, наблюденных КА и вычисленных по модели, составили 1–2 нТл (Петрова, Латышева, 2020).

Совместный анализ магнитных разрезов с картами поверхности Кюри и теплового потока (Artemieva, 2006; Pollack et al., 1993) показал, что положение подошвы намагниченных корней литосферы Восточной Сибири согласуется с данными о температуре низов земной коры и верхней мантии (рис. 4, 5). Возможно, что благодаря холодным блокам повышенной плотности корни литосферы экранируют мантийное тепло и поддерживают стабильно большие значения толщины ледяного горизонта.

Плотностные неоднородности внутреннего строения ЛнЛК и ЯкЛК, пересеченных под



Рис. 5. Кимберлитовая провинция Ленского литосферного корня. Разрез 1–1': *а* — плотностной; *б* — магнитный по аномалиям Z. Разрез 2–2': *в* — плотностной; *г* — магнитный по аномалиям Z. Условные обозначения *1–3* представлены на рис. 2; *4* — п. Усть-Куйга; *5* — кимберлиты.

Fig. 5. Kimberlite province of the Lena lithospheric root. Section 1-1': a — density, δ — magnetic for Z-component anomalies. Section 2–2': e — density, e — magnetic for Z-component anomalies. For symbols 1–3 see Fig. 2; 4 — Ust-Kuyga; 5 — kimberlites.

разными углами, представлены на разрезах (рис. 2–5). На западной окраине ЛнЛК прослеживается до глубины 100 км (60°–75° с.ш.) (рис. 2*3*, профиль 7) и до 140 км (55°–65° с.ш.) (рис. 2*и*, профиль 8). В восточной части он просматривается до глубины 180 км (65°–71° с.ш.) (рис. 2*к*, профиль 9). Пересекающий ЛнЛК вкрест простирания профиль 14 (113°–124° в.д.) (рис. 3*д*), показывает, что максимальная глубина составляет более 150 км и соответствует глубине изотермы 1300°С (Artemieva, 2006), допускающей глубину ЛнЛК до 160–200 км.

ЯкЛК занимает меньшую площадь и имеет среднюю глубину до 60–70 км (рис. 3*д*). ЯкЛК (120°–136° в.д.) пересекается широтным профилем 16. Однако в северо-восточной части он уходит на глубину более 110 км. Рельеф подошвы ЯкЛК согласуется с картой глубин изотермы 1300 °C, оценивающей допустимую глубину ЯкЛК глубже 160 км (Artemieva, 2006).

Исследование литосферы зоны со стабильной толщиной ледяного горизонта многолетней мерзлоты показало, что в контуре ЛнЛК расположена Якутская алмазоносная провинция (Старостин и др., 2016). Через месторождения алмазоносных провинций построены глубинные магнитные и плотностные разрезы. Анализ разрезов показал, что коренные месторождения алмазов тяготеют к корням литосферы (рис. 4, 5). Таким образом, кимберлитовые провинции попадают в область стабильной толщины ледяного горизонта максимальной мощности и льдистости.

На основе данных о толщине ледяного горизонта многолетней мерзлоты РФ по результатам комплексной интерпретации приземных аномалий компонент МПЗ, аномалий силы тяжести и сейсмологических данных получена модель строения литосферы областей со стабильной толщиной ледяного горизонта и кимберлитовых провинций. С высокой вероятностью образование ледяного горизонта большой толщины обусловлено корнями литосферы, экранирующими тепло мантии.

Проведенные авторами статьи исследования позволили получить представление о глубинном строении Восточной Сибири, оценить намагниченность, толщину и плотностные свойства корней литосферы. Подтверждена роль литосферных корней в размещении месторождений алмаза в пределах Северо-Азиатского кратона (Старостин и др., 2016).

СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ЗОН ТАЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

С целью оценки климатических рисков при освоении ресурсов в зоне многолетней мерзлоты территории АЗРФ (Павленко, 2013) в процессе работы исследованы районы ускоренной деградации ледяного горизонта (рис. 2–8). Анализ годовых и сезонных изменений многолетней мерзлоты показал, что определяющую роль на процесс таяния оказывают флюидные каналы вертикальных разломных зон (Петрова и др. 2020а, 2020б). Для оценки рисков использованы карты толщины ледяного горизонта многолетней мерзлоты и среднегодовых температур грунта РФ (рис. 2-3, 6-7) (Петрова и др., 2020а; Stolbovoi, McCallum, 2002). Исследования выявили специфический эффект таяния с образованием сквозных таликов, относящихся к зонам повышенного риска. Они обусловлены влиянием мантийных термофлюидных каналов.

Совместный анализ температуры многолетнемерзлых пород АЗРФ и зон с наименьшей толщиной ледяного горизонта показал, что локализация районов ускоренной деградации многолетней мерзлоты плохо коррелируют с плавными границами среднегодовых изменений температуры (рис. 2, 3). Например, в наиболее холодной области температурной аномалии на севере Таймыра расположены зоны усиленного таяния мерзлоты.

Очаги локального разрушения многолетней мерзлоты Таймыра выявлены на меридиональных (рис. 2б-з, профили 1-7) и широтных плотностных разрезах (рис. 36-в, профили 11-12). К ним приурочены выходы флюидоподводящих каналов, термофлюидный поток по которым может поступать из земной коры с глубины >50-80 км (рис. 2е, 2з, 2л, профили 5, 7, 10). На плотностном разрезе (рис 6а) наглядно представлен вертикальный флюидный канал вдоль профиля, проходящего через сквозной талик в зоне таяния мерзлых пород Таймыра по 100° в.д. Этот же канал пересекается другим профилем (рис. 7б). На магнитных разрезах, построенных по аномалиям вертикальной и горизонтальной компонент МПЗ, ярко видна сквозная термофлюидная проработка пород с глубины 20 км и подпитывающие флюидонасыщенные линзы, расположенные на глубинах ~30 и 50 км (рис. 66, 6в, 7б).

Через сквозные талики как наиболее вероятные районы возникновения опасных природных явлений эндогенного происхождения построены плотностные разрезы (рис. 2, 3). Двумерный расчет, выполненный на площади АЗРФ, позволил по минимумам плотности определить местоположение флюидных каналов на глубине 20 км. Глубина уровня расчета по площади получена по характерным минимумам плотности на разрезах земной коры. Над разрезами в качестве подосновы приведены толщины ледяного горизонта (рис. 2) и площадные расчеты плотности на глубине 20 км (рис. 3).

Визуализация разрезов на основе комплексной интерпретации показала действенность флюидоподводящих каналов на зоны локализации сквозных таликов. Взрывоопасные ситуации могут возникать при появлении таких зон в результате пульсирующей активизации флюидных систем мантии, обусловленной глубокофокусными землетрясениями (Петрова, Копытенко, 2019б).

На основе совместного анализа глубинных разрезов, данных о толщине ледяного горизонта и среднегодовых температурах грунта были выявлены специфические районы сквозных таликов, обусловленные глубинными факторами направленного действия термофлюидных потоков, поднимающихся к поверхности с глубины ~50–100 км (Петрова и др. 2020а).

Минерагения зон таяния многолетней мерзлоты. Проведенное исследование в зоне вечной мерзлоты Восточной Сибири показало, что термические ореолы таяния — сквозные талики, возникающие в докембрийских блоках фундамента под влиянием выходов к поверхности термофлюидных каналов, могут представлять собой горячие пятна рудных узлов гидротермальных месторождений, образующихся из эндогенных газово-водных растворов. Источником растворов и находящихся в них металлов могут быть флюидно-рудные системы, имеющие мантийный источник. В пределах рудных узлов гидротермальных месторождений возможна концентрация месторождений цветных металлов — Си, Pb, Zn, Sb, Sn, благородных металлов — золота и серебра, железа, редких металлов — W, Mo, Ni, Со, Hg, Bi, Sr, B, рассеянных металлов — Re, In, Ge, Ga, Cd, Se, Te, Sc, радиоактивных металлов — урана, тория и неметаллических полезных ископаемых.

Одним из важнейших факторов образования полезных ископаемых внутри горячих пятен рудных узлов и минерагенических зон является вынос к поверхности рудоносных гидротермальных потоков минерализованных флюидов, поставляемых термофлюидными каналами из глубокофокусных тектонических зон докембрия и литосферных элементов верхнемантийных линз (Наливкина, 2004; Наливкина, Петрова, 2018; Петрова, Копытенко 2019а, 20196; Petrova et al., 2019).

Совместный анализ толщины ледяного горизонта многолетней мерзлоты (Петрова и др. 2020а; Stolbovoi, McCallum, 2002) и минерагенических



Рис. 6. Разрезы зон таяния многолетней мерзлоты Таймыра: *a* — плотностной разрез, подоснова — толщина ледяного горизонта; *б* — магнитный разрез по аномалиям Z, подоснова — аномалии Z (высота 450 км); *в* — магнитный разрез по аномалиям H, подоснова — аномалии H (высота 450 км) (Копытенко, Петрова, 2020а): *1* — тектонические структуры: 1 — хребет Альфа; 2 — котловина Макарова; 3 — хребет Ломоносова; 4 — котловина Амундсена; 5 — хребет Гаккеля; 6 — котловина Нансена; 7 — Таймыр; 8 — Сибирская платформа. 2 — Северный морской путь; *3* — положение МП (2010–2020 гг.); *4* — траектория МП; *5* — гипоцентры землетрясений; рудные узлы: *6* — Аи; 7 — цветных металлов.

Fig. 6. Sections of permafrost thaw zones in Taimyr: a — density section, background — the thickness of the ice horizon; δ — magnetic section for Z anomalies, background — Z anomalies (altitude 450 km); e — magnetic section for H anomalies, background — H anomalies (altitude 450 km) (Kopytenko, Petrova, 2020a). 1 — tectonic structures: 1 — the Alpha Ridge; 2 — the Makarov Basin; 3 — the Lomonosov Ridge; 4 – the Amundsen Basin; 5 — the Gakkel Ridge; 6 — the Nansen Basin, 7 — Taimyr; ; 8 — Siberian Platform. 2 — Northern Sea Route; 3 — the position of the magnetic pole (2010–2020 years); 4 — the trajectory of the magnetic pole; 5 — earthquake hypocenters; ore nodes: 6—Au; 7 — non-ferrous metals.



Рис 7. Минерагения зон таяния мерзлоты севера Сибири: a — карта толщины ледяного горизонта; δ — магнитный разрез по аномалиям Н. Цветные металлы: 1 — минерагенические зоны (a — установленные; δ — потенциальные); 2 — минерагенические районы (a — установленные; δ — потенциальные). Благородные металлы: 3 — минерагенические зоны (a — установленные; δ — потенциальные); 4 — минерагенические районы (a — установленные; δ — потенциальные). Потенциальные рудные узлы: 5 — Аи; 6 — Рb; 7 — Ni; 8 — Ni (магматический в ультрамафит-мафитовых комплексах); 9 — Си. Месторождения Au: 10 — россыпные; 11 — рудные; 12 — металлогеническая зона; 13 — тектонические структуры: 1 — Канадский архипелаг; 2 — хребет Альфа; 3 — котловина Макарова; 4 — хребет Ломоносова; 5 — котловина Амундсена; 6 — хребет Гаккеля; 7 — котловина Нансена; 8 — Таймыр; 9 — Сибирская платформа; 14 — гипоцентры землетрясений.

Fig. 7. Minerageny of the melting permafrost zones of the North of Siberia: a — map of the ice horizon thickness; δ — magnetic section for anomalies H. Non-ferrous metals: 1 — mineragenic zones (a — identified; δ — potential); 2 — mineragenic districts (a — identified; δ — potential). Precious metals: 3 — mineragenic zones (a — identified; δ — potential); 4 — mineragenic districts (a — identified; δ — potential); Potential ore nodes: 5 — Au; δ — Pb; 7— Ni; β —Ni (magmatic in ultramafic-mafic complexes); 9 — Cu. Au deposits: 10 — placer deposits; 11 — ore; 12 — metallogenic zone; 13 — tectonic structures: 1 — The Arctic Archipelago; 2 — the Alpha Ridge; 3 — the Makarov Basin; 4 — the Lomonosov Ridge; 5 — the Amundsen Basin; 6 — the Gakkel Ridge; 7 — the Nansen Basin, 8 — Taimyr; 9 — Siberian Platform. 14 — earthquake hypocenters.



СПЕЦИФИКА ЛИТОСФЕРЫ ЗОНЫ

Fig. 8. Pipelines (Russian gas..., 2020): a — Russian Federation; 6 - in the permafrost zone. Depth sections: density — (a, ∂) ; magnetic (z - modulus of the earth's magnetic

field; e — for Z component; = for H component). 4a -gas pipelines; 4b -oil pipelines. For symbols I-3, 5 see Fig. 2.

карт (Волков и др., 2019; Схема..., 2005; Прогнозно-минерагеническая..., 2016) показал хорошую корреляцию сквозных таликов, расположенных на древних блоках фундамента, с рудными узлами и минерагеническими зонами. Внутри очагов горячих пятен флюидно-магматические каналы контролируют рудные месторождения золота, меди, никеля, олова, платины и др. Рассмотренная зона разрушения мерзлоты на самом севере Таймыра демонстрирует рудоконтролирующий характер термофлюидного канала и верхнемантийных линз, расположенных на глубине 30-70 км (рис. 6в; 7). На выходе канала внутри термических ореолов сформировались минерагеническая зона, рудный район и золоторудный узел.

В зоне сквозного талика Норильского района на выходе к поверхности флюидного канала с глубины 15–20 км и под влиянием верхнемантийных линз с глубины 50 и 100 км (рис. 4*a*–*c*) образованы уникальные месторождения платино-медно-никелевые и благородных металлов (Волков и др., 2019). Местоположение никелевых месторождений в собственно магматических в ультрамафит-мафитовых комплексах Норильского района (рис. 7*a*) приведено по материалам Всероссийского научно-исследовательского геологического института имени А. П. Карпинского (Прогнозно-минерагеническая..., 2016).

Наиболее яркий пример значимости рудоконтролирующего фактора термофлюидной проработки — Верхоянская верхнемантийная астенолинза (ВрВА) Северо-Азиатского кратона (Стогний, Стогний, 2005). В контуре ВрВА сформирована Верхояно-Черская золотоносная провинция (рис. 76), которая приурочена к системе глубинных разломов (Старостин и др., 2016).

Рудопроявления и месторождения золота находятся внутри контура Верхоянского регионального магнитного и гравитационного минимумов (60° - 70° с.ш., 125° - 150° в.д.) (Петрова, Латышева, 2020; Старостин идр., 2016). Наиболее четко минимумы магнитного поля проявились в околоземном пространстве на высотах 400 и 450 км по измерениям спутников СНАМР и Swarm (рис. 16). Границы ВрВА оконтуривают глубокие минимумы геомагнитного поля зон отрицательных аномалий: модуля МПЗ, Zи H-компонент до -7 нТл (Копытенко и др., 2021; Thebault et al., 2016).

Внутреннее строение литосферного элемента ВрВА, характер и траектория флюидного канала представлены на плотностном и магнитном разрезах при широтном пересечении линзы профилем 2–2' (рис. 4*6*, 4*e*–3). В создании благоприятных условий для формирования высокой золотоносности месторождений золота в контуре линзы существенная роль принадлежит тепловому потоку термофлюидных каналов (рис. 4*a*), системе подпитывающих линз, выделяемых по плотностным разрезам на глубине 50–60 км и 80–100 км, и рудоконтролирующей структуре древнего фундамента.

Эндогенные факторы разрушения инфраструктуры в районах ускоренной деградации ледяного горизонта. В процессе эксплуатации инфраструктуры в АЗРФ нефтегазовые предприятия, строительная, дорожная и другие хозяйственные отрасли сталкиваются с рядом трудностей, связанных с деградацией грунта в зоне многолетней мерзлоты. С целью изучения механизма опасных зон эндогенного характера проведена комплексная интерпретация аномалий магнитного поля, поля силы тяжести и сейсмологических данных.

Анализ особенностей глубинного строения литосферы позволил выявить районы ускоренного таяния глубинного происхождения. На основе полученных данных возможно прогнозирование мест возникновения опасных зон эндогенного характера, затрудняющих природопользование, ведение хозяйственноэкономической деятельности и разрушающих нефтегазовую инфраструктуру. Исследования выявили специфические районы ускоренной сквозной деградации мерзлых пород, обусловленные эндогенными причинами в результате направленного действия флюидоподводящих каналов глубинного заложения. Это позволит осуществить ранжирование территории АЗРФ по степени риска, что, безусловно, необходимо в процессе проектирования портовой, железнодорожной и аэропортовой инфраструктуры при расширении районов хозяйствования и мониторинга динамики криолитосферы.

Плотностные широтные и меридиональные разрезы построены по профилям, пересекающим опасные зоны сквозных таликов территории АЗРФ (рис. 2–3).

Это зоны активного разрушения многолетней мерзлоты, а в присутствии газогидратов наиболее вероятные районы возникновения взрывоопасных природных явлений эндогенного происхождения. Например, на п-ве Ямал из-за выброса газогидратов произошли 17 криогенных геологических явлений с образованием кратеров, имеющих глубину 33 м и диаметр ~40 м, со следами интенсивного выброса пород и льда (Богоявленский и др., 2017, 2019; Воробьев, 2016). Анализ плотностного широтного разреза показал, что кратеры приурочены к выходу на поверхность мощного вертикального флюидного канала, идущего с глубины 25-45 км и прослеживающегося в мантии до глубины ≥65–70 км (рис. 3г, профиль 13) (Петрова и др., 2020а). Возможно, что причиной для внезапного взрыва и возникновения термокарстов стала пульсация

глубокофокусной разуплотненной линзы флюидонасыщенного слоя (Павленко, 2013; Петрова и др., 2020б; Петрова, Копытенко, 2019а; Петрова, Петрищев, 2013). Активизация термофлюидных каналов на участках развития газогидратов приводит к возникновению взрывоопасных явлений и может угрожать газодобывающей и транспортной инфраструктуре.

Природные явления эндогенного происхождения в зоне вечной мерзлоты могут вызывать техногенные катастрофы.

Масштабная авария под Норильском на производственных сооружениях ТЭЦ-3 Норильско-Таймырской энергетической компании в мае 2020 г. произошла в зоне сквозного талика на выходе флюидоподводящего канала по листрической разломной зоне, прослеживающейся на плотностном разрезе с глубины ~40 км (https://www.interfax.ru/chronicle/avariya-na-teczv-norilske.html).

Возможно, что одной из причин внезапного разрушения и мгновенной просадки грунта под бетонной площадкой, приведшей к разгерметизации резервуара с топливом, явилась миграция гидротермальных потоков минерализованных флюидов по каналу, находящемуся под влиянием флюидонасыщенных слоев, выявленных в мантии на глубине 60–75 км и 150 км (рис. 2*д*, профиль 4).

В 2020 г. обрушился железнодорожный мост через реку Кола в Мурманской области (https:// www.interfax.ru/russia/711245). Анализ широтного плотностного разреза 14 (рис. 3*a*) показал, что мост расположен в зоне сквозного талика на выходе мощного флюидного канала, восходящего из мантии с глубины 60 км. Кроме того, на глубине более 100 км выявлена линза флюидонасыщенного слоя (рис. 3*d*). При наличии сейсмического события с большой вероятностью в слое возможно возникновение пульсаций, приводящих к созданию чрезвычайной ситуации, в том числе к разрушению опор железнодорожного моста в результате активизации термофлюидного канала на выходе в зону сквозного талика.

На территории РФ эксплуатируются тысячи километров трубопроводов (рис. 8) (Газопроводы..., 2020).

В ноябре 2020 г. на 59-км магистрального газопровода «Ямбург — Западная граница СССР» (рис. 8) произошел разрыв с возгоранием (https://www.interfax.ru/russia/735176).

Через место аварии на газопроводе «Ямбург – Западнаяграница СССР» попрофилю Б–Б' (67° в.д.) (рис. 8б) выполнен расчет глубинных разрезов по аномалиям силы тяжести вертикальной и горизонтальной компонентам магнитного поля.

Вертикальная миграция к поверхности термофлюидных потоков приводит к развитию

коррозии трубопроводов. Флюид — перемещающийся из мантии поток легких летучих химически активных соединений, находящихся в конденсированном состоянии. Учитывая дестабилизирующие факторы, которые обуславливают развитие коррозии трубопроводов и емкости для их хранения, необходимо расширять создание и изготовление изделий нового поколения на базе материалов из высококачественных композитных бетонов с наноструктурами.

В процессе дестабилизации нефтегазовой инфраструктуры ведущую разрушающую роль глубинные природные факторы осуществляют в местах выхода на поверхность по вертикальным флюидным каналам глубинного заложения. Пути потока флюидов визуализируются на разрезах благодаря пониженным плотностным и магнитным свойствам (Копытенко и др. 2020; Петрова, Копытенко, 2019а; Петрова, Петрищев, 2011; Петрова и др., 2020а, 2020б). Анализ плотностного и магнитных разрезов по профилю Б–Б' показал, что газопровод пересекает крупный сквозной талик на выходе вертикального термофлюидного канала, выходящего из мантии с глубины >40 км (рис. $86, d- \infty$).

При проектировании и эксплуатации нефтегазовой инфраструктуры, строительстве железнодорожных магистралей и автомобильных дорог в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа (рис. 8) необходима оценка рисков опасных природных явлений эндогенного характера, обусловленных влиянием термофлюидных каналов и детальный мониторинг состояния инфраструктуры вблизи потенциально взрывоопасных зон.

На севере Чукотки в г. Певек в неблагоприятной зоне повышенных рисков эндогенного характера установлена плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов» (рис. 3, профиль 13) (https://ria. ru/20190823/1557825277.html).

«Академик Ломоносов» — головной проект серии мобильных транспортабельных энергоблоков малой мощности. Энергоустановка ПАТЭС имеет максимальную электрическую мощность более 70 МВт и включает две реакторные установки КЛТ-40С. Термофлюидный канал выходит к поверхности из низов земной коры через сквозной крупный талик. Под каналом в мантии выделяются две линзы флюидонасыщенных слоев на глубинах 50–60 км и более 100 км. При наличии сейсмического события с большой вероятностью в этих слоях возможно возникновение пульсаций, что может вызвать чрезвычайную ситуацию.

Следующую энергоустановку ПАТЭС предполагается разместить в акватории полуострова Камчатка (г. Вилючинск) (рис. 8*a*, профиль А–А') (https://atomenergo.spb.ru/7). Расчет глубинных разрезов по аномалиям силы тяжести, по аномалиям модуля МПЗ показал, что в этой зоне складывается другая эндогенная ситуация, чем вблизи г. Певек. Район расположен в мощной разломной зоне высокой сейсмичности с глубокофокусными очагами многочисленных землетрясений, которые с большой долей вероятности могут активизировать пульсации флюидонасыщенных линз, расположенных здесь на глубинах 50 км и 90 км (рис. 8e-e; профиль A–A').

На территории п. Усть-Куйга Усть-Янского улуса (Якутия) предполагается построить и ввести в эксплуатацию атомную станцию малой мощности (ACMM) (рис. 5*в*-*г*) (https://www.vedomosti.ru/press_releases/2020/12/28/v-rosatome-razrabotayut-toplivo-dlya-aes-maloi-moschnosti).

Проектируемую ACMM отличает компактность и модульность, сокращенный период сооружения и высокие стандарты безопасности, а срок эксплуатации составляет не менее 60 лет.

Однако расчет глубинных разрезов по аномалиям силы тяжести и по аномалиям Z-компоненты МПЗ показал, что п. Усть-Куйга расположен в зоне очень крупного сквозного талика на выходе термофлюидного канала, выходящего из мантии с глубины ~30 км. Кроме того, на глубине 40–60 км и около 100 км выявлены мощные линзы флюидонасыщенных слоев (рис. 5). Сейсмическое событие может спровоцировать в этих линзах возникновение пульсаций, приводящих к созданию чрезвычайной ситуации.

Анализ плотностных глубинных разрезов литосферы позволил выявить местоположение глубокофокусных систем флюидных слоев АЗРФ и крупных сквозных таликов. В момент сейсмического события в мантийном флюидонасыщенном слое могут возникать пульсирующие колебания, активизирующие вертикальную миграцию термофлюидных потоков разломных зон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали эффективность применения комплексной интерпретации аномалий магнитного поля, поля силы тяжести и сейсмологических данных для изучения глубинного строения литосферы Восточной Сибири.

В результате работы выявлена специфика строения литосферы областей со стабильной толщиной ледяного горизонта многолетней мерзлоты. Показано, что районы с большими значениями толщины ледяного горизонта тяготеют к мощным корням литосферы, имеющим повышенную плотность и намагниченность. Сделано предположение, что стабильность горизонтов многолетней мерзлоты обеспечивается холодными блоками корней литосферы, которые перекрывают тепло мантии.

На основе комплексной интерпретации приземных аномалий компонент МПЗ, аномалий силы тяжести и гипоцентров землетрясений получена модель строения литосферы областей со стабильной толщиной ледяного горизонта и кимберлитовых провинций. Анализ показал, что коренные месторождения алмазов тяготеют к корням литосферы и практически приурочены к областям стабильного ледяного горизонта многолетней мерзлоты большой мощности (>40 м).

Магнитные аномалии корней литосферы, рассчитанные для высоты КА СНАМР и Swarm по модели компонент МПЗ (Копытенко, Петрова, 20206; Копытенко и др., 2021; Петрова, Латышева, 2020), подтверждены по измерениям КА модуля МПЗ и Z-компоненты (Thebault et al., 2016). Расхождения аномалий литосферных корней, наблюденных КА и вычисленных по модели, составили 1–2 нТл.

Проведенные исследования позволили получить представление о специфике строения литосферы областей со стабильной толщиной ледяного горизонта и кимберлитовых провинций. Сделана оценка намагниченности, толщины и плотностных свойств корней литосферы Восточной Сибири. Кимберлитовые провинции попадают в область стабильной толщины ледяного горизонта. С высокой вероятностью образование ледяного горизонта такой большой толщины обусловлено корнями литосферы, экранирующими тепло мантии.

Анализ наблюдений толщины многолетнего ледяного горизонта выявил, что определяющую роль в процессе деградации мерзлоты играют вертикальные разломы. Исследование показало, что на характер разрушения ледяного горизонта многолетней мерзлоты существенное влияние оказывают сквозные разломы глубинного заложения. Направленное воздействие флюидоподводящих каналов уменьшает толщину многолетнего ледяного горизонта и способствует его локальному разрушению с образованием сквозных таликов. На основе совместного анализа глубинных разрезов, данных о толщине ледяного горизонта и среднегодовых температурах грунта были выявлены специфические районы деградации льда многолетней мерзлоты, обусловленные глубинными факторами направленного воздействия термофлюидных потоков с глубины ~50–100 км.

Проведенное исследование в зоне вечной мерзлоты Восточной Сибири подтвердило, что

термические ореолы таяния, возникающие в докембрийских блоках фундамента под влиянием выходов к поверхности термофлюидных каналов, могут представлять собой горячие пятна рудных узлов, в пределах которых могут концентрироваться цветные и благородные металлы, железо, редкие и радиоактивные металлы и неметаллические полезные ископаемые.

Одним из важнейших факторов образования полезных ископаемых внутри горячих пятен рудных узлов и минерагенических зон является вынос рудоносных гидротермальных потоков минерализованных флюидов, поставляемых термофлюидными каналами из глубокофокусных тектонических зон докембрия и литосферных элементов в виде верхнемантийных линз.

Проведенный анализ геофизических полей выявил специфику строения литосферы в районах ускоренной деградации многолетней мерзлоты. Это позволило предложить механизм образования опасных явлений глубинного происхождения. Полученные данные дают возможность прогнозировать местоположение наиболее опасных зон сквозных таликов эндогенного характера, затрудняющих природопользование, ведение хозяйственно-экономической деятельности и разрушающих инфраструктуру, что создаст основу для проведения ранжирования территории АЗРФ по степени риска.

Анализ плотностных глубинных разрезов литосферы дает возможность выявить положение глубокофокусных систем флюидных слоев территории Арктической зоны РФ. В мантийном флюидонасыщенном слое при наличии сейсмического события возникают пульсирующие колебания, провоцирующие вертикальную миграцию термофлюидных потоков.

С целью оценки рисков реализации инфраструктурных проектов в районах проведения хозяйственно-экономической деятельности в зоне многолетней мерзлоты РФ исследована возможность построения схемы наиболее вероятных зон возникновения опасных природных явлений эндогенного характера.

Областью применения исследований является решение поисковых геолого-геофизических задач, вопросов реализации инфраструктурных проектов и уменьшения рисков освоения ресурсов в зоне многолетней мерзлоты.

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]

- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3(27). С. 4–17. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-3-4-17 [Bogoyavlenskiy V. I., Bogoyavlenskiy I.V., Nikonov R.A. Results of aerial, space and field investigations of large gas blowouts near bovanenkovo field on Yamal peninsula // Arctic: Ecology and Economy. 2017. Iss. 3(27). P. 4–17 (in Russian)].
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В., и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4(36). С. 52–68. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-4-52-68 [Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A., Kargina T.N. Earth degassing in the Arctic: comprehensive studies of the distribution of frost mounds and thermokarst lakes with gas blowout craters on the Yamal peninsula // Arctic: Ecology and Economy. 2019. Iss. 4 (36). P. 52–68 (in Russian)].
- Волков А.В., Галямов А.Л., Лобанов К.В. Минеральное богатство циркумарктического пояса // Арктика: экология и экономика. 2019. № 1 (33). С. 106–117. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-1-106-117 [Volkov A.V., Galyamov A.L., Lobanov K.V. The mineral wealth of the circum-arctic belt // Arctic: Ecology and Economy. 2019. Iss. 1 (33). Р. 106–117 (in Russian)].
- 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)].
- Газопроводы и нефтепроводы России [Электронный pecypc]. URL: https://energybase.ru/pipeline (дата обращения 03.11.2020) [Russian gas and oil pipelines [Elektronnyj resurs] URL: https://energybase.ru/ pipeline (accessed 03.11.2020)].
- Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. № 4. С. 10–20 [Konishchev V.N. Response of permafrost to the climate warming // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya. 2009. Iss. 4. Р. 10–20 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Латышева О.В., Петрова А.А. Влияние разломных зон земной коры на эволюцию толщины и кромки ледяного покрова Арктики // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2020. Вып. 674. С. 207–212 [Kopytenko Yu.A., Latysheva O.V., Petrova A.A. Influence of the Earth's crust fault zones on the evolution of the thickness and edge of the Arctic ice cover // Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. 2020. Iss. 674. P. 207–212 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Компоненты магнитных аномалий Амеразийского бассейна // Труды

XV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2020a. C. 292–295 [Kopytenko Yu.A., Petrova A.A. Components of magnetic anomalies in the Amerasian basin // Materials of XV conference «Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics». Saint-Petersburg. 2020a. P. 292–295 (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 [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. 2020б. 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. 2020b. P. 288–291 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Гурьев И.С., Лабецкий П.В., Латышева О.В. Анализ информативности магнитного поля земли в околоземном космическом пространстве // Космические исследования». 2021. Т. 59. № 3. С. 185–191. https://doi. org/10.31857/S0023420621030067 [Kopytenko Y.A., Petrova A.A., Alekseev V.F., Gur'ev I.S., Labetskiy P.V. application of altitude models of Earth's magnetic field for solving geophysical problems. Cosmic Research. 2021. Iss. 57. № 3. P. 163–168. https://doi.org/10.1134/ S0010952519030067].
- Копытенко Ю.А., Черноус С.А, Петрова А.А. и др. Исследования изменений положения аврорального овала в условиях смещения магнитного полюса Земли // «Сборник трудов школы-конференции Проблемы Геокосмоса 2018» 2018. С. 338–343 [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. С. 289–296. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_25].
- Наливкина Э.Б. Эволюция раннедокембрийской земной коры. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 204 с. [Nalivkina E.B. Evolution of the Early Precambrian crust // SPb: Izd. VSEGEI, 2004. 204 p. (in Russian)].
- Наливкина Э.Б., Петрова А.А. Магнетитовая зона земной коры континентов. СПб.: Изд. ВСЕГЕИ, 2018. 46 с. [Nalivkina E.B., Petrova A.A. The magnetite

zone of the continental crust. SPb: Izd. VSEGEI, 2018. 46 p. (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 [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 (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. 25p. (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 ИЗМИ-РАН. 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 КРА-УНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019б. 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. 2019b.V. 1(41). Р. 37–53 (in Russian)].
- Петрова А.А., Копытенко Ю.А. Геотермальные зоны юга Восточной Сибири // Вестник КРА-УНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019а. Вып. 42. № 2. С. 25–41. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-25-41 [*Petrova A.A., Kopytenko Yu.A.* Geothermal zones of the south of East Siberia // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019a. V. 2(42). P. 25–41 (in Russian)].
- 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 [Petrova A.A., Latysheva O.V. Verification of the model of anomalies of the Arctic magnetic field components // Proceedings of the International conference «Global Problems of the Arctic and Antarctic». FCIARctic. Arkhangelsk. 2020. P. 279–284 (in Russian)].
- 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 2020а. С. 815–820 [Petrova A.A., Latysheva O.V., Kopytenko Yu.A. Endogenous natural hazards in the Arctic zone of the Russian Federation // Proceedings of the International conference «Global Problems of the Arctic and Antarctic». FCIARctic. Arkhangelsk. 2020a. P. 815–820 (in Russian)].
- Петрова А.А., Латышева О.В., Копытенко Ю.А. Природные явления эндогенного происхождения в Арктическом бассейне // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020б. № 4. Вып. 48. С. 37–53. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-49-63 [Petrova A.A., Latysheva O.V., Kopytenko Yu.A. Natural phenomena of endogenic origin in the Arctic basin // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2020b.V. 4(48). 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., Петрищев М.С. Ареал базальтов триаса Уренгойского района Западной Сибири по геомагнитным данным // Материалы II школысеминара «Гординские чтения». ИФЗ РАН. Москва. 2013. С. 155–160 [Petrova A.A., Petrishchev

M.S. The areal of Triassic basalts in the Urengoy district of Western Siberia according to geomagnetic data // Materials of the II school-seminar « Gordinsky readings ». IFZ RAS. Moscow.2013. P. 155–160 (in Russian)].

- Петрова А.А., Петрищев М.С., Копытенко Ю.А., Латышева О.В. Выявление флюидоподводящих каналов в Арктических морях по аномалиям магнитного и гравитационного полей // Материалы Всероссийской конференции: Глобальные проблемы Арктики и Антарктики. ФИЦКИА РАН. Архангельск 2020в. С. 810–815 [Petrova A.A., Petrishchev M.S., Kopytenko Yu.A., Latysheva O.V. Identification of fluid-carrying channels in the Arctic seas by magnetic and gravitational field anomalies // Proceedings of the International conference «Global Problems of the Arctic and Antarctic». FCIARctic. Arkhangelsk. 2020c. P. 810–815 (in Russian)].
- Прогнозно-минерагеническая карта российской Федерации и ее континентального шельфа. Масштаб 1:2 500 000 // Гл. редактор О.В. Петров. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2016 [Forecast-mineragenic map of the Russian Federation and its continental shelf. Scale 1:2 500 00 // Chief Editor Petrov O.V. SPb.: Izd. VSEGEI, 2016 (in Russian)].
- 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 // Вестник Московского университета. 2016. С. 34–43 [Starostin V.I., Izbekov E.D., Razin L.V., Sakiya D.R. Perspectives of the detection of large and unique noble metal deposits in the Northeastern Siberian platform // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriâ 4, Geologiâ. 2016. Iss. 2. P. 34–43 (in Russian)].
- 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 [Stogny G.A., Stogny V.V. Structure of the southeastern rim of the North Asian Craton // The proceedings of the XXXVIII Tectonic meeting. 2005. V. 2. P. 238–241 (in Russian)].
- Схема размещения металлогенических зон, рудных районов и рудных узлов России. Масштаб 1:14 000 000 // СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005 [Placement scheme of metallogenic zones, ore areas and ore nodes in Russia. Scale 1:14 000 000 // SPb.: Izd. VSEGEI, 2005 (in Russian)].
- Хромова Т.Е., Медведев А.А., Муравьев А.Я., Зверкова Н.М. Электронный атлас «Снег и лёд на Земле» // Лед и снег. 2015. № 2 (130). С. 5–8. https://doi. org/10.15356/2076-6734-2015-2-5-8 [Khromova T.Y., Medvedev A.A., Muraviev A.Ya., Zverkova N.M. Digital Atlas «Snow and Ice on the Earth» // Ice and Snow. 2015. Iss. 2 (130). Р. 5–8 (in Russian)].
- Amante C. and 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.
- Artemieva, I.M., Global lox10 thermal model TC1 for the continental lithosphere: implications for lithosphere

secular evolution // Tectonophysics. 2006. V. 416. P. 245–277.

- Bonvalot S., Balmino G., Briais A. et al. World Gravity Map // Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD. Paris. 2012. http:// bgi.omp.obs-mip.fr.
- International Seismological Centre (2020). On-line Bulletin [Elektronnyj resurs]. URL: https://doi.org/10.31905/ D808B830 (accessed 20.11.2020).
- Jansson J.K., Taş N. The microbial ecology of permafrost // Nat. Rev. Microbiol. 2014. V. 6. P. 414–425. https:// doi.org/10.1038/nrmicro3262.
- Litvinova T., Petrova A. Heterogeneous structure of the lithosphere of the Taimyr Peninsula // Session EMRP2.3/ERE6.7 Advancements in magnetic anomaly studies and natural resources exploration. Vienna. 2016. EGU2016-12688.
- *Litvinova T., Petrova A.* Search a way out of fluid-magmatic activity on the periphery of the thermal structure Siberian magnetic anomaly // Geophysical Research Abstracts. V. 19. EGU General Assembly, Session EMRP2.2/ERE6.6 - Advancements in magnetic field studies and natural resources exploration. Vienna. 2017. EGU2017-12376.

- 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.
- 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. P. 239–247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9 28.
- *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.
- Shur Yu., Kenneth M. Hinkel, Frederick E. Nelson The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // Permafrost and Periglac. Process. 2005. V. 16. Iss. 1. P. 5–17. https://doi. org/10.1002/ppp.518.
- 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.
- *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.

SPECIFICS OF THE LITHOSPHERE OF THE PERMAFROST ZONE OF EASTERN SIBERIA

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 deep structure of the lithosphere in Eastern Siberia are presented. Based on data on the thickness of the permafrost ice horizon, gravity anomalies, geomagnetic field anomalies and seismological data, a model of the structure of the lithosphere of regions with a stable ice horizon thickness was obtained. It is shown that areas with large values of the thickness of the ice horizon gravitate towards the powerful roots of the lithosphere with increased density and magnetization. It has been suggested that the stability of permafrost horizons is provided by cold blocks of the lithosphere roots, which overlap the heat of the mantle. To search for endogenous causes of climatic risks in areas with accelerated degradation of permafrost, deep sections of the earth's crust were built. Analysis of data on the thickness of the ice horizon together with deep sections showed that fluid channels of deep vertical fault zones play a decisive role in the permafrost destruction process. Accelerated degradation of permafrost is localized near the outcrops of fluid-magmatic channels, where specific melting zones have been identified in the form of through taliks caused by endogenous factors of directional action under the influence of fluid flows rising from a depth of ~50–100 km. The studies carried out make it possible to understand the possible causes of the destruction of infrastructure in the permafrost zone and to predict the location of the most probable areas of accelerated degradation.

Keywords: permafrost, roots of the lithosphere, through taliks, thermofluid channels.

Поступила в редакцию 25.12.2020 г. После доработки 01.03.2021 г. Принята в печать 28.03.2021 г.