

УДК 550.37; 551.243; 551.254; 551.164

ИЗУЧЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ТОЛЩ ГЕОРАДАРНЫМ МЕТОДОМ (СЕВЕРНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ)

© 2020 г. П.Н. Александров¹, Ю.А. Морозов², А.Л. Кулаковский²,
М.А. Матвеев², А.И. Смутьская², Ю.Ф. Соколова²

¹ Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли РАН, г. Москва,
г. Троицк, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Представлены результаты исследования с помощью георадарного профилирования приповерхностной структуры консолидированных метаморфических толщ в метатерригенно-осадочном палеопротерозойском ладожском комплексе юго-восточной части Балтийского щита. На участках с детально изученной геологическими методами разрывно-складчатой структурой решались три методические задачи, первая из которых – выявление консолидированных кристаллических пород ладожского комплекса под покровом рыхлых отложений; вторая – прослеживание на глубину поверхностных элементов разрывной и складчатой структуры; третья – оценка возможных причин и факторов, определяющих прослеживаемый на радарограммах контраст свойств элементов структуры пород по диэлектрической проницаемости и/или электропроводности. Показана возможность определения георадарным методом положения поверхности консолидированных пород, скрытых под рыхлыми отложениями. Установлена достаточно высокая степень соответствия картируемой на поверхности структуры со стилистикой структурных картин на профилях. На основе аналитического изучения состава пород и процессов их минерально-вещественных преобразований при складчатых и разрывных деформациях на участках профилирования даны оценки роли ряда структурно-вещественных факторов в проявлении повышенной электропроводности и диэлектрической проницаемости некоторых разностей пород и в создании соответствующей контрастности разреза, что принципиально важно для интерпретации радарограмм.

Ключевые слова: георадарное профилирование, электропроводность, структура метаморфических толщ, система чехол–фундамент, Северное Приладожье.

Введение

Изучение глубинной структуры консолидированных объемов земной коры, в частности ее метаморфических комплексов, основывается на возможностях широко используемых геологических и геофизических методов, каждый из которых имеет свои естественные ограничения. Геологические методы обычно включают экстраполяцию на глубину картируемой на поверхности тектонической структуры регионального ранга или мезомасштабного уровня, вследствие чего детальные элементы исследуемой структуры порой остаются вне рассмотрения и анализа. Такие же ограничения, связанные как с методическими аспектами, так и с разрешающими возможностями аппаратуры, касаются и комплекса геофизических методов (сейсмических, магнитных, гравитационных и др.). И, поскольку проблема детализации глубинной структуры более высоких рангов, включая крупномасштабные элементы, недоступные для непосредственного изучения, остается насущной, возникает необходимость поиска новых методов или апробирования возможностей уже существующих в приложении к локальным особенностям строения и состава консолидированных толщ. С этой целью нами была предпринята попытка изучения приповерхностной структуры метаморфических толщ

палеопротерозойского ладожского комплекса юго-восточной части Балтийского щита методом георадарного профилирования в низкочастотном диапазоне. Первые результаты этого опыта и предварительная интерпретация полученных данных представлены в настоящей статье.

Геологическая характеристика района и объектов исследования

В пределах Северного Приладожья метатерригенные флишоидные образования ладожского комплекса, представляющего палеопротерозойский осадочный чехол на архейском гранито-гнейсовом основании, претерпели зональный метаморфизм (от зеленосланцевого до гранулитового уровня) и полифазные деформационные преобразования в свекофеннскую эпоху тектогенеза (1.89–1.75 млрд. лет). В результате, в обстановке регионально проявленной транспрессии сформировалась сложная разрывно-складчатая структура, включающая разноранговые шарьяжно-надвиговые, интерференционно-складчатые и куполовидные формы [Морозов, 1999]. Куполовидные структуры, известные как классические гранито-гнейсовые “купола облекания” [Eskola, 1949], представляют собой субизометричные выступы архейского гранито-гнейсового фундамента среди метатерригенных пород ладожского комплекса (рис. 1), интерпретируемые нами как интерференционные формы разноплановой региональной складчатости [Морозов, Гафт, 1985; Морозов, 1999].

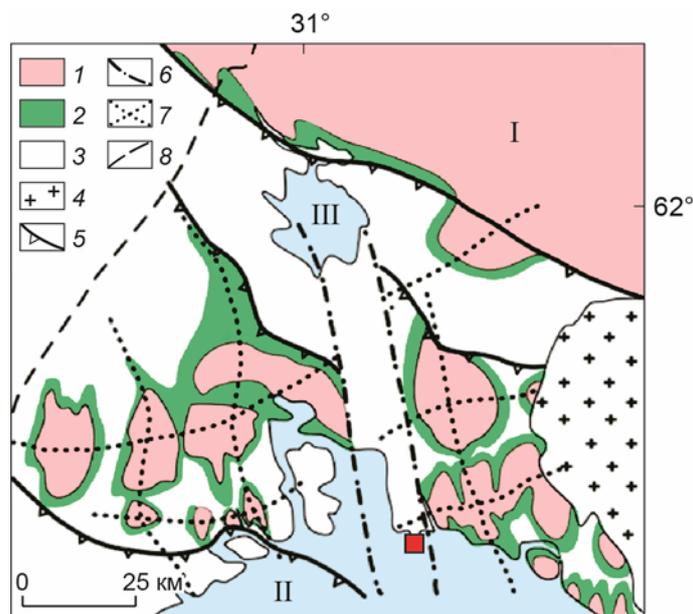


Рис. 1. Схема строения Северного домена Приладожья. 1 – гранито-гнейсы архея; 2 – вулканогенно-осадочный комплекс ятулия; 3 – метатурбидиты калевия; 4 – Салминский плутон гранитов рапакиви; 5 – границы субдоменов разрывно-надвигового характера; 6 – крупные разломы; 7 – основные направления осей региональных систем складок; 8 – государственная граница РФ. I – Карельский массив, II – Ладожское озеро, III – оз. Янисъярви. Красный квадрат – исследуемый участок на полуострове Хунукка

Fig. 1. The structure of the Northern domain of Ladoga region. 1 – Archean granite gneisses; 2 – volcanic-sedimentary yatulian complex; 3 – kalevian metaturbidites; 4 – Salminsky granite-rapakivi pluton; 5 – boundaries of subdomains of discontinuous thrust nature; 6 – large faults; 7 – the main directions of the axes of the regional fold systems; 8 – the state border of the Russian Federation. I – Karelian massif, II – Ladoga Lake, III – Lake Yanisjärvi. Red square is the study area on the Hunukka Peninsula

Эти формы возникли в зоне проявления процессов гранитизации (силлиманит-ортоклазовая субфация в схеме Д.А. Великославинского [1971]) в виде пликативных складчатых структур в условиях сближения деформационных свойств пород фундамента и чехла при реоморфизме консолидированных пород основания [Морозов, Кулаковский, Смутьская, 2020]. Куполовидные формы на территории Приладожья сгруппированы в двух доменах – Сортавальском (западном) и Питкярантском (восточном), разделенных линейной зоной локализованных разрывно-складчатых деформаций Хунукка–Янисъярви. Эта зона была выбрана в качестве объекта приложения георадарного метода, поскольку на одном из хорошо обнаженных участков п-ова Хунукка нами были ранее детально изучены внутренняя разрывно-складчатая структура, минеральный состав пород и особенности деформационно-вещественных преобразований в зонах разломов, что важно для интерпретации получаемых радарограмм. В этой связи нами были поставлены три задачи, первая из которых – выявление консолидированных кристаллических пород ладожского комплекса под покровом рыхлых отложений; вторая – прослеживание на глубину поверхностных элементов разрывной и складчатой структуры; третья – оценка возможных причин и факторов, определяющих фиксируемый на радарограммах контраст электрических свойств элементов структуры пород (диэлектрической проницаемости и/или электропроводности).

Ближкие по направленности исследования с существенным методическим уклоном были проведены недавно [Luodes, 2015] на сопряженной территории Финляндии.

Породы, слагающие флишоидные по своей природе толщи ладожского комплекса, представлены (рис. 2, *слева*) чередующимися в слоистом разрезе исходными разностями пелитов и псаммитов (алевролитов, песчаников), которые в этом месте были метаморфизованы в условиях силлиманит-мусковитовой субфации ($T=500-620$ °С, $P=2.5-4$ кбар) на глубинах порядка 10–12 км и позже выведены тектоникой и эрозией на современную поверхность. Метапелиты, как правило, представлены существенно слюдястыми биотит-мусковитовыми разностями сланцев с резко подчиненным содержанием плагиоклаза, микроклина и кварца и с хорошо выраженной, плоско упорядоченной сланцеватой структурой.

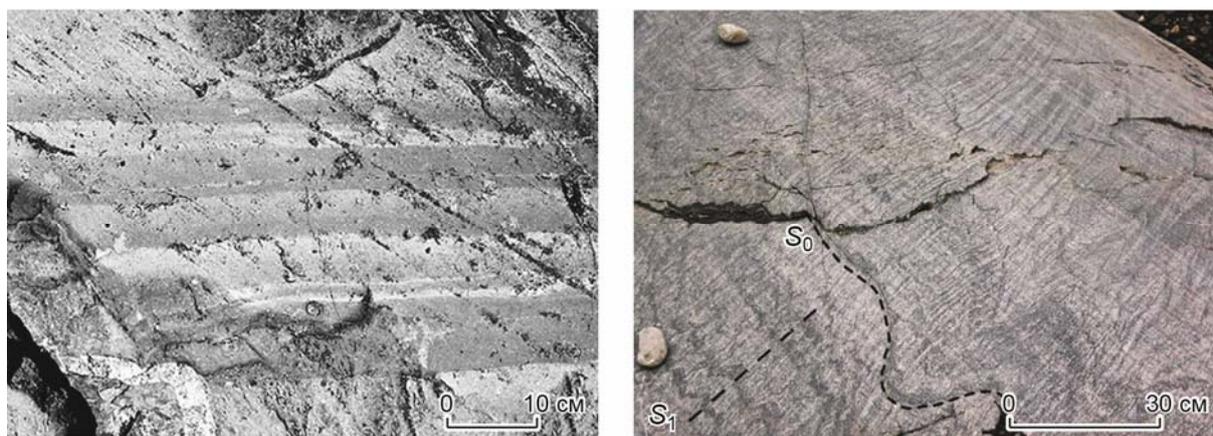


Рис. 2. Первичное слоистое чередование метапелитов (темное) и метапсаммитов (светлое) в исходно флишоидной толще ладожского комплекса (*слева*) и переработка слоистости S_0 (короткие штрихи) деформационно-метаморфической полосчатостью S_1 (длинные штрихи) при складчатости (*справа*)

Fig. 2. The primary layered alternation of metapelites (dark) and metapsammities (light) in the originally flyschoid thickness of the Ladoga complex (*on the left*) and the transformation of stratification S_0 (short dashes) by deformation-metamorphic layering S_1 (long dashes) during folding (*on the right*)

В метапсаммитах, наоборот, каркасные силикаты превалируют над слюдами и определяют преимущественно массивный характер сложения матрицы, который местами консервативно сохраняется вплоть до гранулитовой зоны метаморфизма, несмотря на широкое развитие в породах деформационно-метаморфической полосчатости, постепенно затухивающей первичную расслоенность (рис. 2, справа).

Для характеристики структуры приповерхностной части разреза был использован георадар ОКО-2 с несущей частотой 250 МГц, теоретическое обоснование использования которого приведено в работе [Александров, 2017]. Временной интервал записи составлял 200 нс. На участке исследований практически отсутствовали источники электромагнитных шумов. Глубокая обработка не использовалась в связи с тем, что были получены радарограммы очень высокого качества в силу высокоомности разреза и большой контрастности электрофизических свойств горных пород. Глубинность исследований составила до 10 метров при диэлектрической проницаемости массива горных пород 4.5 [Владов, Судакова, 2017; Старовойтов, 2008].

Результаты профилирования

На участке п-ова Хунукка, где обнажения кристаллических пород образуют положительные формы рельефа и лишь частично перекрыты рыхлыми четвертичными отложениями, в рамках первой задачи было выполнено георадарное профилирование по четырем субпараллельным линиям (рис. 3). Две из них – 1А–1Б, 2А–2Б – не выходили за контуры четвертичных осадков; две других – 3А–3Б и 4А–4Б – своими концами захватывали прилегающие к четвертичным породам выступы консолидированных сланцев; результаты выполненного георадарного профилирования приведены на рис. 4.



Рис. 3. П-ов Хунукка. Схема расположения четырех георадарных профилей на участке перекрытия кристаллических пород чехлом рыхлых четвертичных отложений. Белые штриховые линии – границы распространения поверхностных четвертичных отложений

Fig. 3. The Hunukka Peninsula. The arrangement of four georadar profiles on the site of overlapping crystalline rocks with a cover of loose quaternary deposits. White dashed lines are the boundaries of distribution of surface quaternary sediments

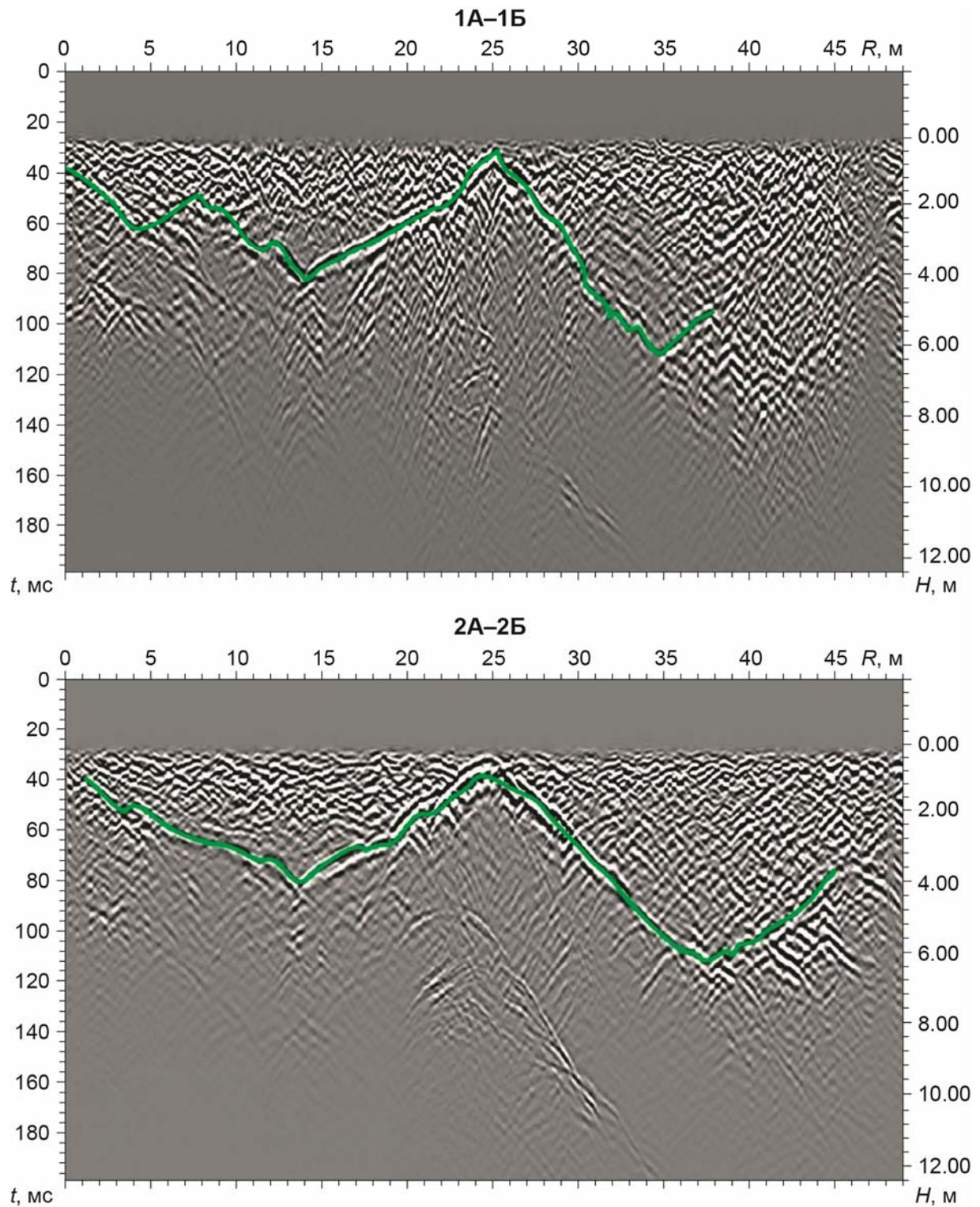


Рис. 4.

Fig. 4.

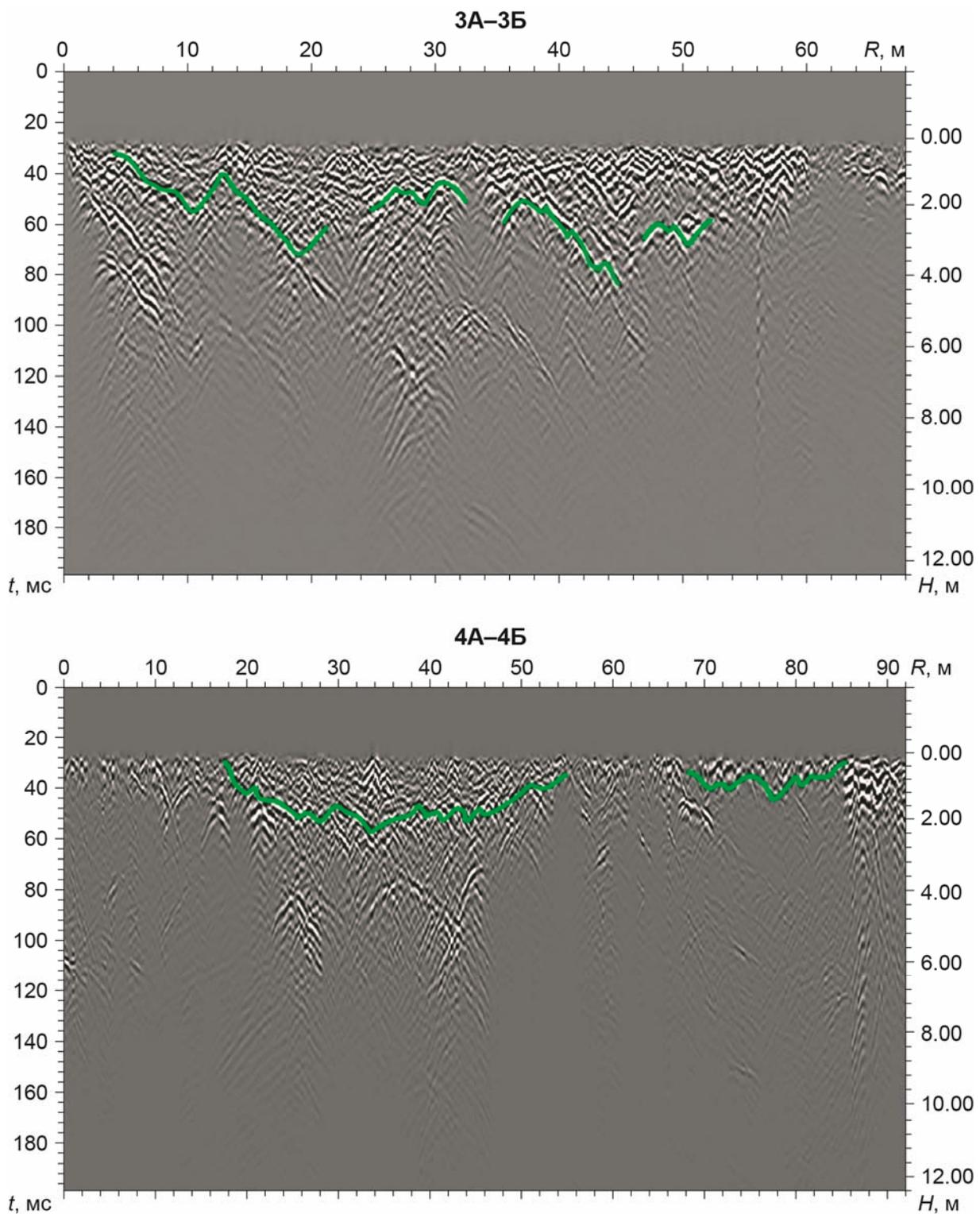


Рис. 4. П-ов Хунукка. Результаты георадарной съемки по четырем профилям на участке, частично перекрытом рыхлыми четвертичными отложениями. Зеленым цветом подчеркнута граница между рыхлыми породами и кристаллическими образованиями. Положение профилей см. на рис. 3

Fig. 4. The Hunukka Peninsula. The results of georadar survey for four profiles in a section partially overlapped by loose quaternary sediments. Green color highlights the border between loose rocks and crystalline formations. The position of the profiles, see Fig. 3

При корреляции осей синфазности на полученных георадарных профилях четко выделяется граница между рыхлыми породами и кристаллическими образованиями, которая во всех случаях трассируется от уреза воды вплоть до выхода кристаллических пород на земную поверхность, отражая морфоструктуру постледникового рельефа. Нарушение корреляции (исчезновение отражающего горизонта) наблюдается на окончаниях профилей 3А–3Б и 4А–4Б, находящихся на массивах кристаллических пород, а также на участках, где мощность рыхлых отложений уменьшается.

Для решения второй задачи был выбран обнаженный участок побережья, практически полностью сложенный кристаллическими породами с весьма ярко проявленной сложной разрывно-складчатой структурой (рис. 5).



Рис. 5. Фотография поверхности участка, сложенного кристаллическими породами ладожского комплекса с разрывно-складчатой структурой

Fig. 5. A photo image of the site surface composed by crystalline rocks of the Ladoga complex with a fault-folded structure

В деталях обнажений выбранного участка четко прослеживаются проявления затронувшей первичную слоистость напряженной складчатости, которая весьма изменчива как по амплитуде, так и по степени сжатости и имеет вид от достаточно открытых складок с округлыми замками (рис. 6, *вверху слева*) до тесносжатых и изоклиальных (рис. 6, *вверху справа*). Эти складки сочетаются с дискретными проявлениями разрывных нарушений, часто приуроченных к их крыльям (см. рис. 6, *вверху справа*) или же “нарезающих” породы на пластиноподобные литоны (рис. 6, *внизу слева*), порой называемые “слайс-структурами” [Леонов, Морозов, Никитин, 2008].

Такие синскладчатые разрывы составляют единую масштабно-иерархическую систему (от отдельных обнажений до мезоструктур картируемого масштаба) фрактально соподчиненных нарушений, формирующих своеобразный внутренний каркас всей разломной зоны Янисъярви–Хунукка, что хорошо видно на структурной схеме, приводимой на рис. 7.

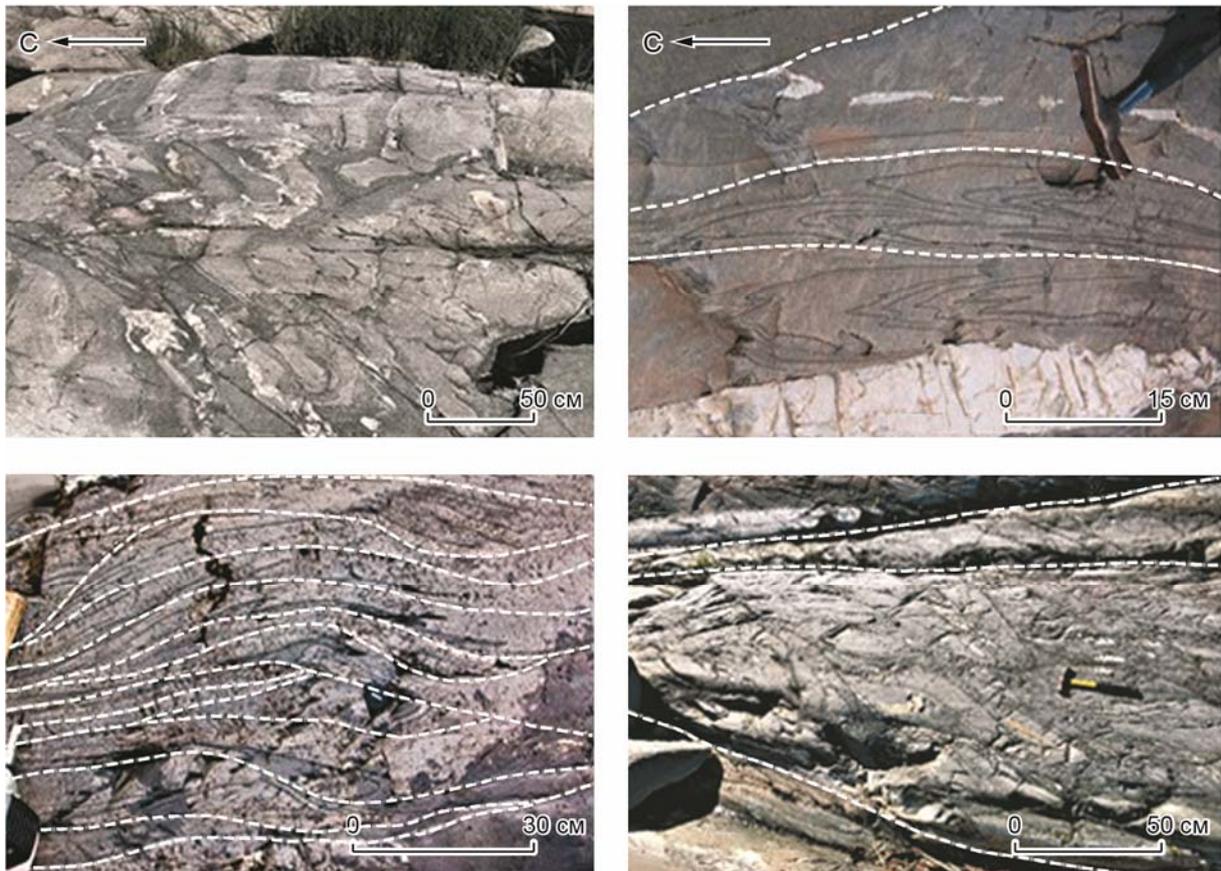


Рис. 6. Сочетание открытых складок (*вверху слева*) с изоклинальными (*вверху справа*) и дробных слайс-структур (*внизу слева*) с разномасштабными разрывами (*внизу справа*), нарушающими первичную слоистость. Фотографии обнажений внутри разломной зоны Янисъярви–Хунукка. Штриховыми линиями отмечены проявления на поверхности разрывных сместителей

Fig. 6. The combination of open folds (*upper left*) with isoclinic folds (*upper right*) and fractional slice structures (*below left*) with different-scale faults (*below right*) that dislocate the primary layering. The photos of outcrops within the Yanisyarvi–Hunukka fault zone. Dashed lines are the fault tracers

Структура рассматриваемой разломной зоны (см. рис. 7) в целом определяется субпараллельными разрывами, которые ограничивают протяженные, вытянутые в субмеридиональном направлении пластины складчато-деформированных или интенсивно расланцованных пород метафлишовой формации. Шарниры складок практически повсеместно круто падают к югу (60° – 70°), испытывая в отдельных случаях заметную ундуляцию до умеренно наклонных погружений.

Разрывные нарушения, отмечаемые, как правило, зонами интенсивного расланцевания или милонитизацией пород, представлены субвертикальными и круто наклонными (55 – 75°) поверхностями с устойчивым падением к западу. Размеры смещений по отдельным разрывам определить не удалось из-за отсутствия достоверных маркеров. Но поскольку в дробном тектоническом переслаивании оказались крупные пачки существенно метапсаммитового и метапелитового состава, в исходном разрезе обычно чередующиеся в интервалах в десятки метров, вполне вероятно, что суммарная амплитуда смещений может быть значительной и достигать сотен метров–первых километров.

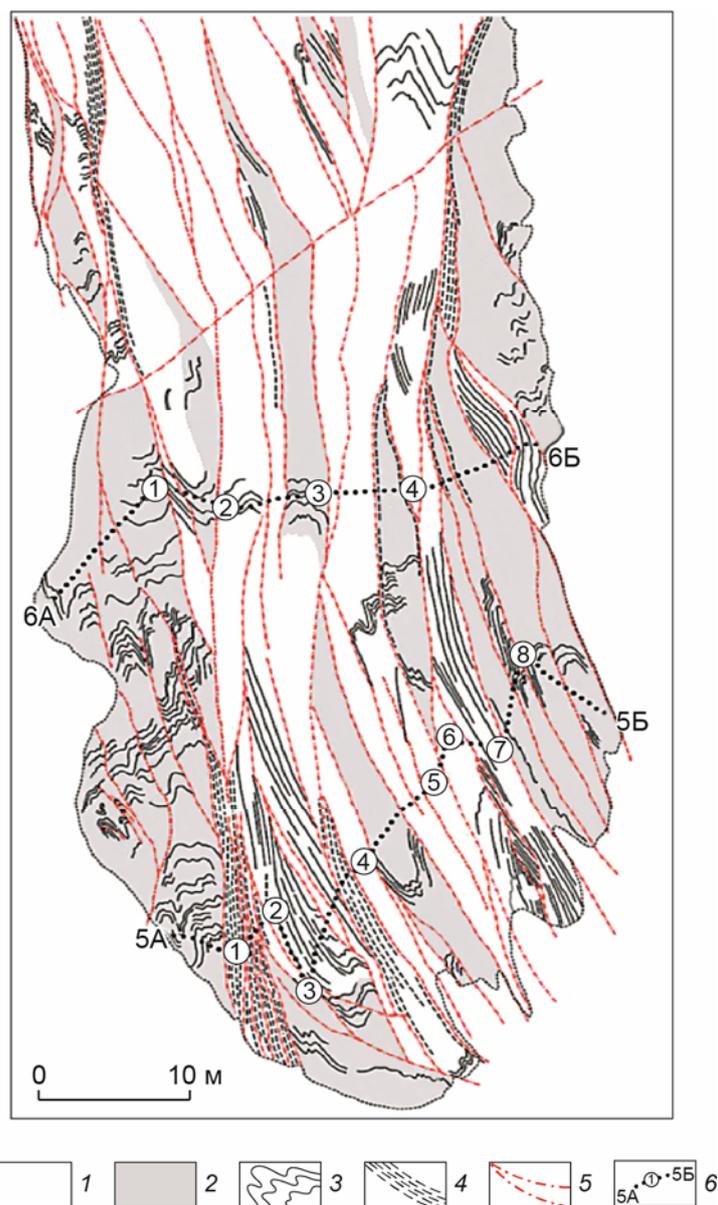


Рис. 7. П-ов Хунукка. Структурная схема участка исследований. 1 – метапелиты; 2 – метапесчаники; 3 – слоистость; 4 – разломные тектониты; 5 – разрывные нарушения; 6 – линии профилей (в кружках – номера пикетов)

Fig. 7. The Hunukka Peninsula. The structural diagram of the research site. 1 – metapelites; 2 – meta-sandstones; 3 – layering; 4 – fault tectonites; 5 – faults; 6 – lines of profiles (numbers of pickets are in circles)

Георадарное просвечивание на исследуемом участке проводилось по двум профилям, положение которых показано на рис. 7; протяженность профиля 5А–5Б составляла 43.5 м, профиля 6А–6Б – 64 м. Положение пикетов на линиях профилей, к которым привязывалась георадарная съемка, фиксировалось по GPS-координатам и контролировалось с помощью рулетки. Георадарные профили через разрывно-складчатую зону в кристаллических породах ладожского комплекса представлены на рис. 8.

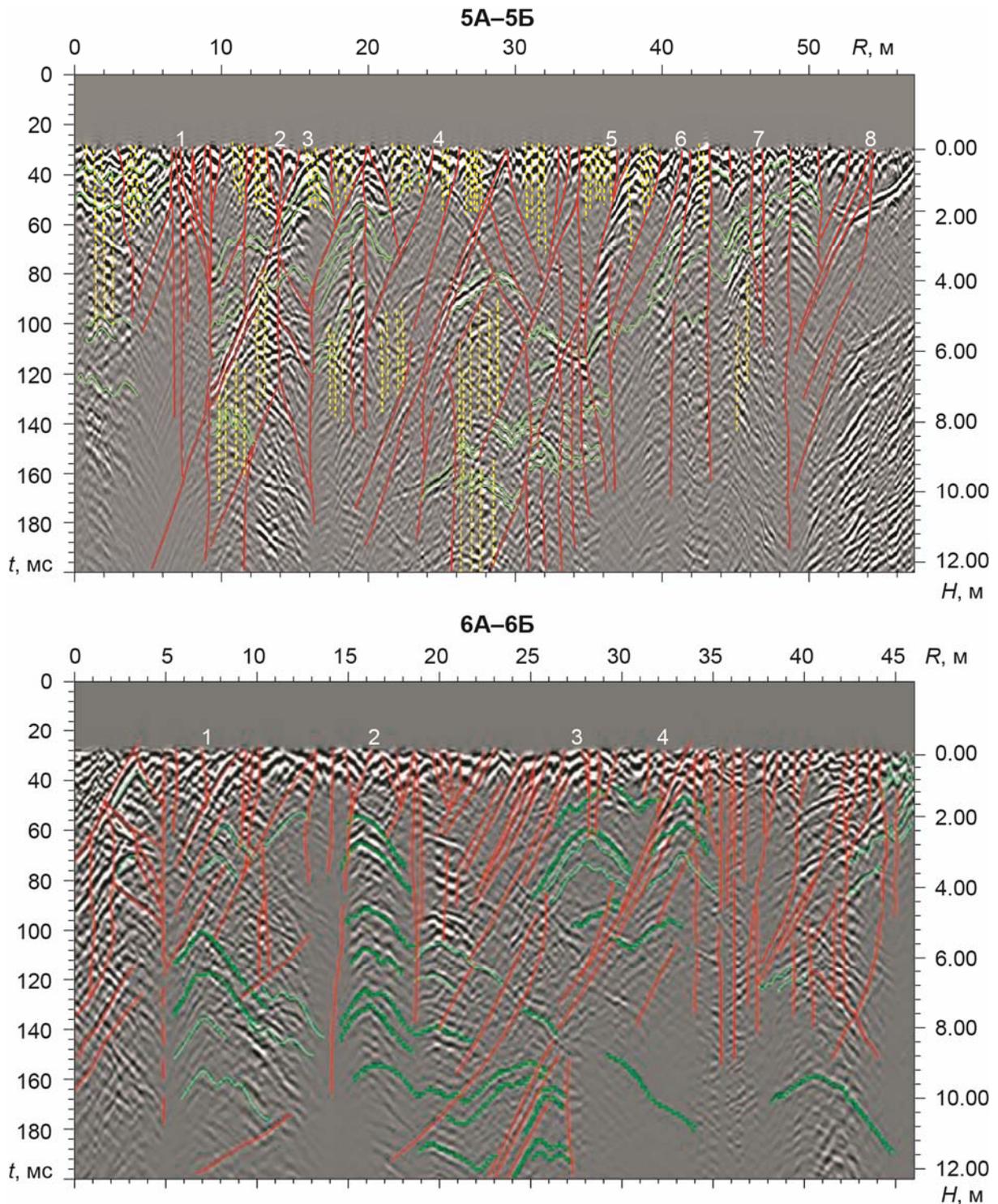


Рис. 8. Георадарные профили через разрывно-складчатую зону в кристаллических породах ладожского комплекса. Положение профилей см. на рис. 7. Зеленым цветом подчеркнута смятая в складки слоистость; красным выделены разрывные нарушения, желтым – предполагаемая метаморфическая полосчатость

Fig. 8. Georadar profiles through a fault-folded zone in crystalline rocks of the Ladoga complex. The position of the profiles, see Fig. 7. Green color underlines folded strata; red highlights discontinuous faults; yellow indicates the metamorphic layering

Обсуждение результатов

Одна из трех сформулированных в начале статьи задач данного исследования – оценка возможных причин и факторов, определяющих видимый на радарограммах контраст по диэлектрической проницаемости и/или электропроводности разных элементов структуры пород (складок, зон разрывов), чьи минерально-вещественные и структурно-текстурные особенности будут рассмотрены далее.

Как отмечалось выше, исходная флишеидная слоистость создана чередованием метатерригенного субстрата, в разной степени обогащенного слоистыми (биотит, мусковит и др.) и каркасными (микроклин, плагиоклаз, кварц и др.) силикатными минералами. Преобладание слюдястых минералов в метапелитовых прослоях и заметная обедненность ими метапсаммитовых слоев уже само по себе предполагает контраст свойств как по диэлектрической проницаемости, так и по электропроводности. Более того, следует иметь в виду, что испытанная этими породами синметаморфическая деформация определила заметные различия в характере структурированности этих двух разновидностей, приводя, как правило, к интенсивному расщеплению существенно слюдястых прослоев (рис. 9, *вверху слева*) и к достаточно слабой текстурной упорядоченности матрицы метапсаммитов (рис. 9, *вверху справа*).

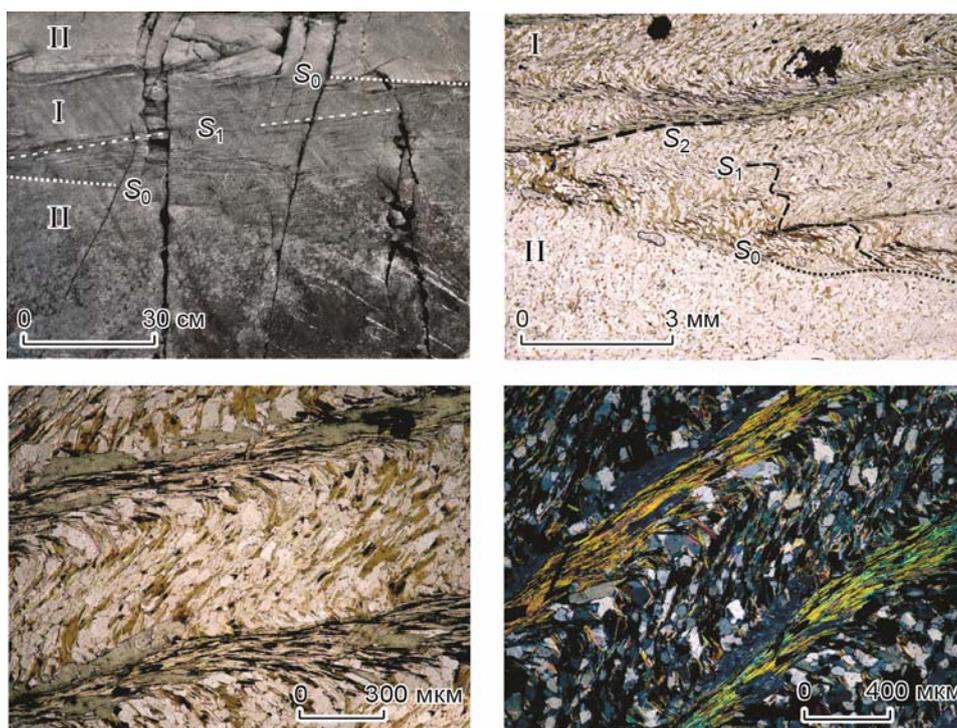


Рис. 9. Метапелиты (I) и метапсаммиты (II) ладожского комплекса: соотношение первичной слоистости S_0 и сланцеватости S_1 в обнажении (*вверху слева*); шлиф с кренуляционными швами (S_2) внутри метапелитовых прослоев (*вверху справа*); шлифы с кренуляционными швами (S_2), обогащенными гидратированным мусковитом, в проходящем свете (*внизу слева*) и при скрещенных Николях (*внизу справа*)

Fig. 9. Metapelites (I) and metapsammmites (II) of the Ladoga complex: the ratio of primary strata (S_0) and schistosity (S_1) in outcrop (*upper left*); thin section with crenulation seams (S_2) inside the metapelite interlayers (*upper right*); thin sections with crenulation seams (S_2) enriched with hydrated muscovite in transmitted light (*below left*) and with crossed nicols (*below right*)

Возникшая на самой ранней кинематической стадии сланцеватость S_1 оказывается приуроченной преимущественно к метапелитовым прослоям, и впоследствии именно в этом текстурно подготовленном субстрате локализовались более поздние наложенные деформации, приводя к формированию кренуляционных швов S_2 , обогащенных гидратированным мусковитом (рис. 9, внизу).

Таким образом, получается, что в совокупности именно метапелитовые прослои в силу своего минерально-фазового состава (концентрация гидроксильных групп и воды в гидратированных слюдах) и упорядоченной текстуры в противоположность метапсаммитам могут обладать повышенной электропроводностью, вероятно, определяя фиксируемую на радарограммах слоеподобную контрастность среды по этому параметру.

Говоря о проводящих свойствах породного матрикса, нельзя не упомянуть углеродную или графитовую минерализацию в качестве вероятного фактора и агента электропроводности пород. В породах ладожского комплекса практически во всех зонах метаморфизма в том или ином количестве действительно фиксируется углеродная минерализация, иногда присутствующая в значительных объемах, характерных для месторождений графита [Биске, Колодей, 2014]. На рассматриваемом нами участке с разломной зоной в субстрате метатерригенных пород также обнаружено в некотором количестве проявление углеродного вещества (рис. 10), которое диагностировано нами с помощью рамановской спектроскопии как аморфный углерод (рис. 11).

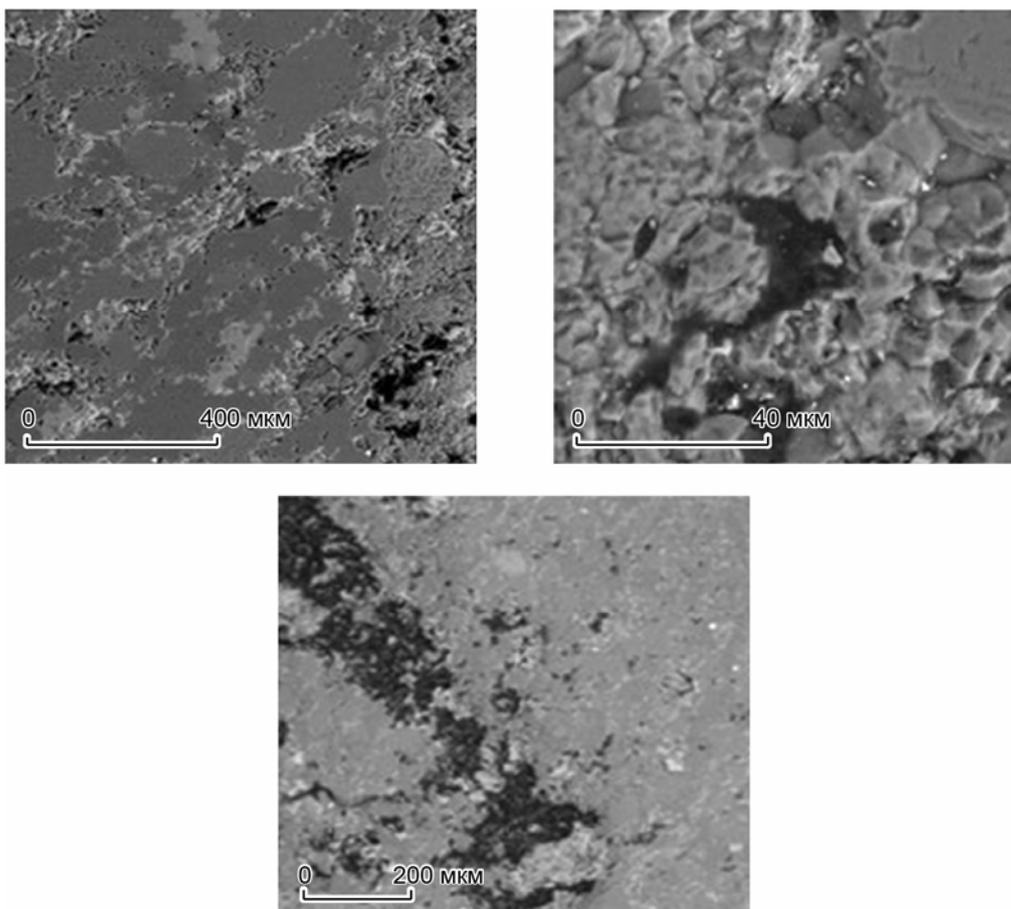
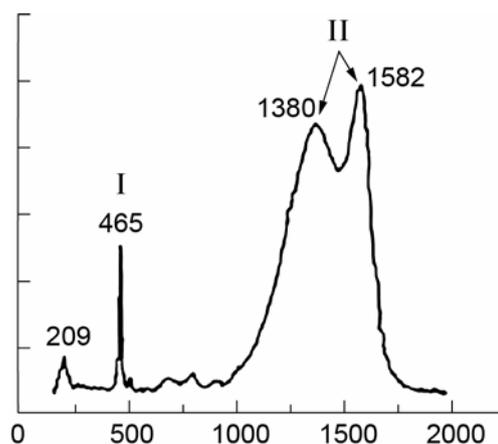


Рис. 10. Изображения шлифов метапсаммита с углеродным веществом в отраженных электронах

Fig. 10. Backscattered electron image of the metapsammite thin section with a carbon matter

Рис. 11. Рамановский спектр, свидетельствующий об аморфной модификации углерода: I – кварц, II – углерод. Вертикальная ось – интенсивность, усл. ед.; горизонтальная – $\Delta\nu$, cm^{-1}

Fig. 11. Raman spectrum indicating amorphous carbon modifications: I – quartz, II – carbon. The vertical axis is the intensity, cu; horizontal – $\Delta\nu$, cm^{-1}



Однако, судя по результатам микроскопического исследования выделения углерода здесь преимущественно спорадические, “островные” (см. рис. 10, *вверху*), хотя бывают и удлинённо-линзовидные, полосовидные (см. рис. 10, *внизу*). Отчетливой приуроченности углерода к определенной литологии разреза (метапелитовым или метапсаммитовым прослоям) выявить не удалось, и можно только констатировать его появление в породах описанной разломной зоны. Этот факт также позволяет рассматривать углеродную минерализацию в качестве возможного агента электропроводности рассматриваемых пород, но, судя по всему, не главенствующего.

Минеральное и структурно-текстурное изучение этих пород показало, что в ходе деформационно-метаморфических преобразований при подвижке массивные или же в той или иной степени огнейсованные породы кварц-плагиоклаз-биотитового состава превращаются в преимущественно слюдистые сланцы с обилием гидрослюд мусковит-иллитового ряда и хлорита. При этом гидрослюды замещают чешуйки исходного биотита по спайности (см. рис. 12, *вверху справа*) и локализуются вдоль узких ветвистых зон в кварц-полевошпатовом матриксе (см. рис. 12, *внизу*).



Рис. 12. “Охристые” тектониты разломных зон (*вверху слева*) и их микроскопическое выражение в шлифах в проходящем свете (*вверху справа*) и скрещенных Николях (*внизу*)

Fig. 12. The “ocherous” tectonites of fault zones (*upper left*) and their microscopic expression in thin sections in transmitted light (*upper right*) and with crossed nicols (*below*)

Здесь имеет место типичная реакция гидролиза полевых шпатов (плагиоклаза и микроклина) и кварца с разложением на слюды и силикагель, которая в зонах локализации деформации проходит практически полностью, так как в них, как правило, отсутствуют реагенты – каркасные силикаты. В результате, в породах формируется густая сеть “каналов”, сложенных гидратированными слоистыми силикатами (гидрослюдами и хлоритом), содержащими свободные гидроксильные группы и воду в межслоевых пространствах, что имеет принципиальное значение для проявления электропроводящих свойств породного субстрата.

Близкий по генезису, но менее масштабный по своему проявлению тип тектонитов связан в рассматриваемых породах с упомянутыми выше “слайс-структурами”, по которым, несомненно, происходили заметные смещения, приведшие к дискордантным соотношениям внутренних элементов сложения сопряженных пластиноподобных литонов (рис. 13, *вверху слева*). В этом случае вдоль поверхностей сместителей формируются тонкие зоны (миллиметры, первые сантиметры, иногда даже пленки) макроскопически черного афанитового материала (рис. 13, *вверху справа*), обычно сложенного микрозернистой обломочной матрицей с проявлениями в ней тонко раскристаллизованных потоков гидрослюд иллит-сметитового состава и выделений рудных минералов типа гематита (рис. 13, *внизу*).

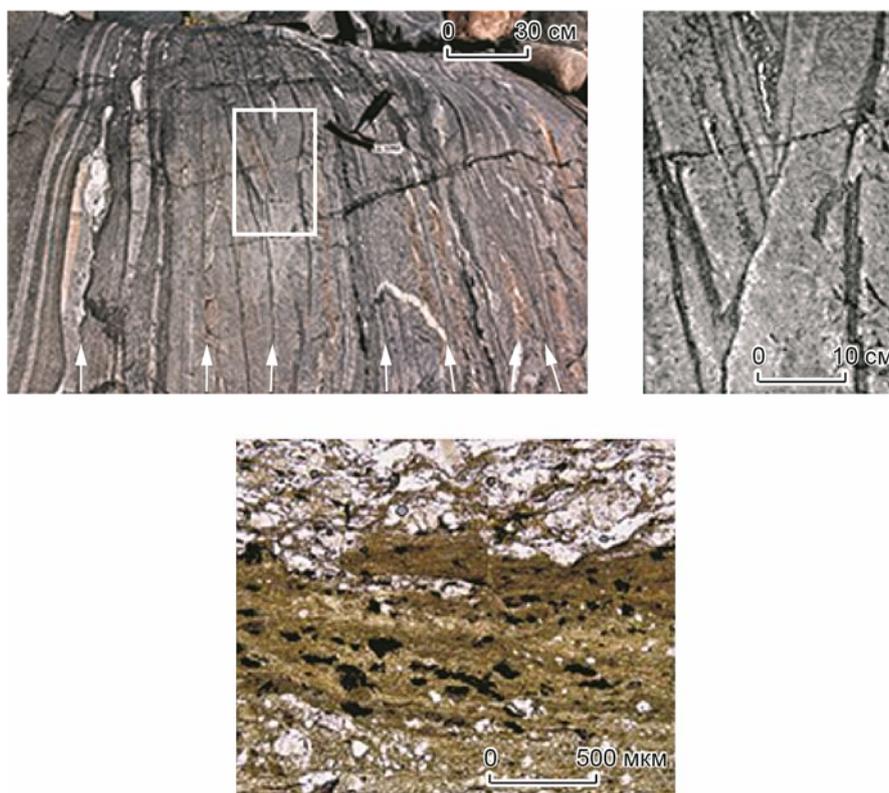


Рис. 13. Обнажение с разрывными поверхностями слайс-структур, отмеченными белыми стрелками (*вверху слева*, белый контур – граница фрагмента обнажения, приводимого на фотографии справа); поверхность одного из сместителей с локализацией черного афанитового материала (*вверху справа*); шлиф породы с афанитовым материалом (*внизу*)

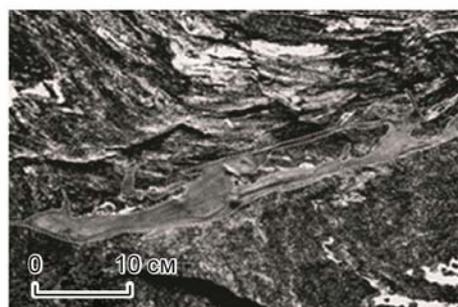
Fig. 13. Outcrop with fault surfaces of slice structures marked with white arrows (*upper left*, white outline – border of the outcrop fragment given in the photograph on the right); the surface of one of the displacers with localization of black aphanite material (*upper right*); thin section of the rock with aphanite material (*below*)

Направленность минеральных преобразований исходной метапсаммит-пелитовой породы здесь близка вышеописанной реакции гидролиза полевых шпатов с тем дополнением, что помимо дробления и перекристаллизации субстрата, возможно, имело место и его фрикционное плавление. На это указывает близкий характер сложения такой же афанитовой матрицы в псевдотахилитовых прожилках, выявленных и подробно изученных нами в отдельных разрывных зонах того же участка (рис. 14) [Морозов и др., 2019б].



Рис. 14. Разрывная зона с псевдотахилитами (черные прожилки) в обнажении метапсаммитов (*вверху*). Белый контур – границы фрагмента обнажения, приводимого *внизу*

Fig. 14. The rupture zone with pseudotachylites (black veins) in the outcrop of metapsammites (*above*). White outline – borders of the outcrop fragment given *below*



Для этих прожилков было показано, что мусковитсодержащие бластокатаклазиты зоны разлома по метапсаммит-пелитовому субстрату при высокоскоростных смещениях предположительно сейсмогенной природы претерпевают частичное плавление с последующей раскристаллизацией стекла в иллит-сметитовый агрегат (рис. 15).

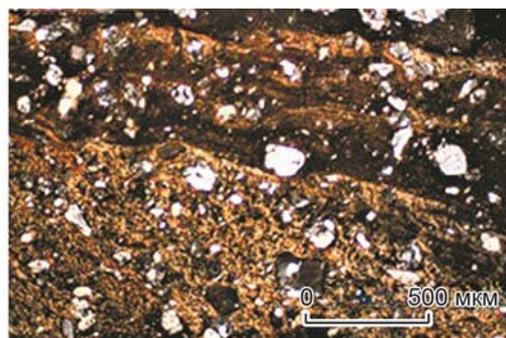
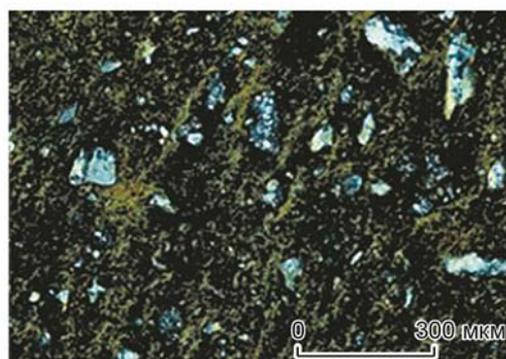


Рис. 15. Шлифы псевдотахилита: общий вид (*вверху слева*) и его детали в проходящем свете (*вверху справа*) и в скрещенных Николях (*внизу*)

Fig. 15. Thin sections of a pseudotachylite: general view (*upper left*) and its details in transmitted light (*upper right*) and with crossed nicols (*below*)



При этом микронзондовое изучение составов слюдястых минералов всех стадий преобразования породы при разрывообразовании позволило выявить единый тренд их эволюции от исходного биотита до гидрослюд иллит-сметитового и, собственно, смектитового состава (рис. 16).

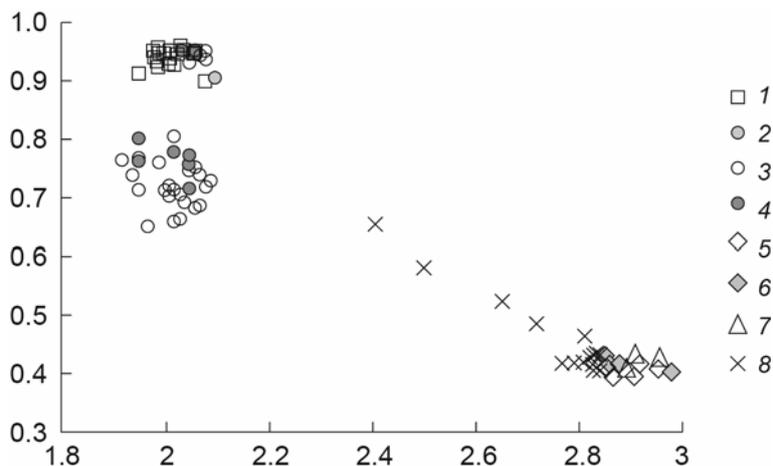


Рис. 16. Диаграмма составов слюдястых минералов в апометасаммитовых бластокатаклазитах и псевдотахилитах в разломной зоне п-ова Хунукка, показывающая единый тренд их эволюции от исходного биотита до гидрослюд иллит-сметитового состава: 1 – мусковиты вмещающих гнейсов и бластокатаклазитов; 2 – иллит-сметиты бластокатаклазитов; 3 – иллит-сметиты псевдотахилитов с хаотичной структурой; 4 – иллит-сметиты псевдотахилитов с упорядоченной структурой; 5 – биотиты гнейсов и бластокатаклазитов; 6 – биотиты обломочные в матрице псевдотахилита; 7 – биотиты в прожилках, секущих матрицу псевдотахилита; 8 – биотиты гидратированные. Вертикальная ось – $XAl_{tot} = Al_{tot}/(Al_{tot}+Ti+Fe+Mg)$; горизонтальная – октаэдрические суммы катионов в формульных единицах $\sum VI$, ф.ед.

Fig. 16. Diagram of the mica minerals compositions in apometapsammitic blastocataclasites and pseudotachylites in the Hunukka Peninsula fault zone, showing a single trend of their evolution from the original biotite to hydromica of illite-smectite composition: 1 – muscovites of host gneisses and blastocataclasites; 2 – illite-smectites of blastocataclasites; 3 – illite-smectites of pseudotachylites with a chaotic structure; 4 – illite-smectites of pseudotachylites with an ordered structure; 5 – biotites of gneisses and blastocataclasites; 6 – detrital biotites in the pseudotachylite matrix; 7 – biotites in veins, cutting the pseudotachylite matrix; 8 – hydrated biotites. Vertical axis – $XAl_{tot} = Al_{tot}/(Al_{tot}+Ti+Fe+Mg)$; horizontal – octahedral sums of cations in formula units $\sum VI$, fu

Сведения о составе, структуре и минерально-фазовых преобразованиях пород в зонах разломов позволяют заключить, что визуализация разрывных поверхностей на радарограммах в значительной степени может быть связана с формированием вдоль поверхностей сместителей текстурированного матрикса, обогащенного гидрослюдами и близкими к ним по электропроводности минералами (графит, рудный).

Выводы

Результаты проведенных работ по георадарному профилированию мезоструктуры картируемого масштаба консолидированных метаморфических пород позволили сделать ряд выводов, полезных для геологии метаморфитов и электромагнитных методов геофизики.

Использование георадаров на площадях, закрытых маломощным рыхлым чехлом, позволяет определить положение рельефа кровли консолидированных кристаллических

пород и доминирующие простирания скрытых для прямого наблюдения геологических тел и элементов структуры.

Георадарное профилирование метаморфических толщ дает возможность достаточно адекватно выявить особенности их строения до глубин 8–10 м, с визуализацией ее отдельных складчатых и разрывных элементов, общей стилистики строения и пространственного соотношения доминирующих направлений их простирания и погружения. Можно констатировать достаточно высокую степень соответствия картируемой на поверхности структуры характеру структурной картины, получаемой на георадарных профилях.

Аналитическое изучение составов пород и процессов их минерально-вещественных преобразований при складчатых и разрывных деформациях на участках профилирования позволило оценить и предположить значимую роль ряда структурно-вещественных факторов в проявлении электропроводности и диэлектрической проницаемости пород и в создании контрастности разреза по этим свойствам, что принципиально важно для интерпретации получаемых радарограмм. В частности показано, что процессы синдеформационного гидролиза полевых шпатов и кварца приводят к обогащению метапелитовых прослоев, тектонитов зон разломов и элементов вторичного деформационно-метаморфического расслоения (метаморфическая полосчатость) гидрослюдами, определяя их повышенную электропроводность и предпочтительную визуализацию на профилях. Также отмечено присутствие и потенциальная роль в рассматриваемых явлениях углеродного материала, а также, рудных фаз, возникающих в ходе гидролитического разложения полевых шпатов и концентрирующихся в зонах разломных тектонитов.

Таким образом, метод георадарного профилирования показал свою перспективность для изучения деталей геологического строения консолидированных толщ на их современных эрозионных срезах и приповерхностных глубинах. Его развитие в этом направлении требует постановки соответствующих задач и проведения ряда методических работ по совершенствованию интерпретации получаемых данных.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН и ЦГЭМИ ИФЗ РАН, частично по гранту РФФИ № 19-05-00256 (структурообразование в системе чехол–фундамент) и по Программе № 8 фундаментальных исследований Президиума РАН (минерально-текстурные преобразования в зонах разломов).

Литература

- Александров П.Н.* Теоретические основы георадарного метода. М.: Физматлит, 2017. 120 с.
- Биске Н.С., Колодей В.А.* Спектроскопия комбинационного рассеяния графита из месторождений и рудопроявлений Приладожья // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2014. № 17. С.103–109.
- Великославинский Д.А.* Метаморфические зоны в Северном Приладожье и оценка температур метаморфизма кианитового и андалузитового типов регионального метаморфизма // Метаморфические пояса СССР. Л.: Наука, 1971. С.61–69.
- Владов М.Л., Судакова М.С.* Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: Учебное пособие. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
- Леонов М.Г., Морозов Ю.А., Никитин А.В.* Постумная тектоника и механизм эксгумации гранитных массивов (на примере Прибайкалья и Тянь-Шаня) // Геотектоника. 2008. № 2. С.3–31.
- Морозов Ю.А.* О роли транспрессии в формировании структуры Балтийского щита // Геотектоника. М.: Наука, 1999. № 4. С.37–51.
- Морозов Ю.А., Гафт Д.Е.* О природе гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья // Структура и петрология докембрийских комплексов. М.: ИФЗ АН СССР, 1985. С.3–121.

- Морозов Ю.А., Кулаковский А.Л., Матвеев М.А., Смутьская А.И. О вертикальной структурной зональности в метаморфогенной коре (на примере Северного Приладожья) // Проблемы тектоники континентов и океанов: Материалы LI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2019а. Т. II. С.67–73.
- Морозов Ю.А., Матвеев М.А., Смутьская А.И., Кулаковский А.Л. Псевдотахилиты – два генетических типа // Доклады академии наук. 2019б. Т. 484, № 5. С.589–594.
- Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.
- Eskola P. The problem of mantled gneiss domes // Quart. J. Geol. Soc. London. 1949. V. 104. Pt. 4. P.461–476.
- Luodes H. Ground penetrating radar and assessment of natural stone. Espoo: Geological Survey of Finland, 2015. 46 p.

Сведения об авторах

АЛЕКСАНДРОВ Павел Николаевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, 108840, г. Москва, г. Троицк, а/я 30. Тел.: +7(495) 840-70-62. E-mail: alexandr@igemi.troitsk.ru

МОРОЗОВ Юрий Алексеевич – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-90-15. E-mail: morozov@ifz.ru

КУЛАКОВСКИЙ Алексей Львович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-90-15. E-mail: akulakovskij@mail.ru

МАТВЕЕВ Максим Алексеевич – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-90-15. E-mail: matveevmaksim93@mail.ru

СМУЛЬСКАЯ Анна Игоревна – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-90-15. E-mail: a-smulskaya@mail.ru

СОКОЛОВА Юлия Федоровна – ведущий инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-90-15. E-mail: sokol@ifz.ru

STUDYING OF THE METAMORPHIC STRATUM SUBSURFACE STRUCTURE BY THE GEORADAR METHOD (THE NORTHERN LADOGA REGION)

P.N. Aleksandrov¹, Yu.A. Morozov², A.L. Kulakovskij²,
M.A. Matveev², A.I. Smulskaya², Yu.F. Sokolova²

¹ *Geoelectromagnetic Research Center of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Troitsk, Russia*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. The results of studying the subsurface structure of consolidated metamorphic strata using georadar profiling conducted in the metaterrigenous Paleoproterozoic Ladoga complex of the southeastern part of the Baltic Shield are presented. In the areas with a detailed study by geological methods of the fractured-folded

structure, three methodological problems were solved: 1) the identification of consolidated crystalline rocks of the Ladoga complex under the cover of loose deposits; 2) depth tracking of surface elements of faults and folded structure; 3) an assessment of the possible causes and factors that determine the properties contrast of the rock structure elements visible in radargrams by dielectric constant and/or electrical conductivity. The possibility of determining by georadar method the position of the consolidated rocks surface hidden under loose deposits is shown. A fairly high degree of compliance of the structure mapped on the surface with the style of the structural pictures on the profiles is obtained. Based on the analytical study of the composition of rocks and the processes of their mineral-material transformations during folded and fracture deformations in the profiling areas, the role of a number of structural-material factors in the manifestation of the increased conductivity and dielectric permittivity of some rocks in creating the corresponding section contrast is assessed, which is fundamentally important for interpretation of received radargrams.

Keywords: georadar profiling, electrical conductivity, structure of metamorphic strata, cover-basement system, Northern Ladoga region.

References

- Aleksandrov P.N., *Teoreticheskie osnovy georadarnogo metoda* (The theoretical basis of the georadar method), Moscow: Physmatlit, 2017, 120 p.
- Biske N.S., Kolodey V.A., Raman spectroscopy of graphite from deposits and ore occurrences of the Ladoga region, *Geology and Minerals of Karelia*, 2014, no. 17, pp. 103-109.
- Escola P., The problem of mantled gneiss domes, *Quart. J. Geol. Soc. London*, 1949, vol. 104, pt. 4, pp. 461-476.
- Leonov M.G., Morozov Yu.A., Nikitin A.V., Posthumous tectonics and the exhumation mechanisms of exhumation of granitic plutons: the case of the Transbaikal region and the Tien Shan, *Geotectonics*, 2008, no. 2, pp. 3-31.
- Luodes H., *Ground penetrating radar and assessment of natural stone*. Espoo: Geological Survey of Finland, 2015, 46 p.
- Morozov Yu.A., On the role of transpression in the structure formation of the Baltic shield, *Geotectonics*, 1999, no. 4, pp. 37-51.
- Morozov Yu.A., Gaft D.E., On the nature of granite-gneiss domes of the Northern Ladoga, in *Structure and Petrology of Precambrian Complexes*, Moscow: Institute Physics of the Earth USSR Academy of Sciences, 1985, pp. 3-121.
- Morozov Yu.A., Kulakovskiy A.L., Matveev M.A., Smulskaya A.I., On vertical structural zoning in a metamorphogenic crust (as exemplified by the Northern Ladoga), in *Problems of tectonics of continents and oceans*, Moscow: GEOS, 2019, vol. 2, pp. 67-73.
- Morozov Yu.A., Matveev M.A., Smulskaya A.I., Kulakovskij A.L., Two genetic types of pseudotachylytes, *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 484, pt. 2, pp. 129-133.
- Starovoitov A.V. *Interpretation of georadar data*. Training Manual, Moscow: MSU Publishing, 2008, 192 p.
- Velikoslavinsky D.A., Metamorphic zones in the North Ladoga area and temperature estimation of metamorphism of kyanite and andalusite types of regional metamorphism, in *Metamorphic belts of the USSR*, Leningrad: Nauka, 1971, pp. 61-69.
- Vladov M.L., Sudakova M.S., *Georadiolokation. From the physical basis to promising direction*. Training manual, Moscow: GEOS, 2017, 240 p.