

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

УДК 550.389.1

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-427-438

МАГНИТОМЕТРИЯ И ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К КАРТИРОВАНИЮ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ ЕДОМНОГО КОМПЛЕКСА

Л.В. ЦИБИЗОВ^{1,2}, Е.И. ЕСИН^{1,2}, А.В. ГРИГОРЕВСКАЯ¹, К.А. СОСНОВЦЕВ²*

¹ — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

² — Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
г. Новосибирск, Россия

**TsibizovLV@ipgg.sbras.ru*

MAGNETOMETRY AND GROUND PENETRATING RADAR IN APPLICATION TO MAPPING OF POLYGONAL WEDGE ICE OF YEDOMA COMPLEX

L.V. TSIBIZOV^{1,2}, E.I. ESIN^{1,2}, A.V. GRIGOREVSKAYA¹, K.A. SOSNOVTSEV²*

¹ — Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian
Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² — Novosibirsk national research state university, Novosibirsk, Russia

**TsibizovLV@ipgg.sbras.ru*

Received November, 16, 2018

Accepted December, 12, 2018

Keywords: ground penetrating radar, magnetometry, polygonal wedge ice.

Summary

Paper is dedicated to geophysical mapping of polygonal wedge ice. Magnetometric and ground penetrating radar surveys were implemented on a small area of Yedoma ice complex on Kurungnakh island in Lena river delta. Such deposits are widely spread on a huge areas of Siberia and Alaska. The study was conducted near the thermoerosional gully, which propagates along the most thick ice wedges. Polygonal pattern is observable on high-resolution aerial imagery and digital elevation model - this data was used during the interpreting of obtained results. Study area (40×50 m) was covered with high-resolution magnetic survey at the elevation of 2 m with 2×2 m step and with ground penetrating radar survey along profiles with 1 m distance between the profiles. Map of total magnetic field anomalies allow to determine the ice wedges of Yedoma ice complex distinctly. Difference between maximum

Citation: Tsibizov L.V., Esin E.I., Grigorevskaya A.V., Sosnovtsev K.A. Magnetometry and ground penetrating radar in application to mapping of polygonal wedge ice of yedoma complex. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 427–438. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-427-438

positive (polygons centers) and negative (ice wedges) anomalies reaches 6 nT (error of the survey is 0,3 nT). Beyond that smaller ice wedges which penetrate the ice wedges of Yedomo complex are also observable in magnetic field. Basing on ground penetrating radar data an amplitude slice of at 3,5 m depth was built. Yedomo ice wedges are observable at depth of 3–4 m. Ground penetrating radar data is quite noisy due to surface inhomogeneity (puddles, knolls, etc.). Results of the surveys were compared in the light of practical application of the methods for above mentioned goal. Magnetometric method appears as more efficient than ground penetrating radar survey: it does not require a contact with the surface and more rapid, it is more sensitive as the case stands. Ground penetrating radar method may have advantages in the case of natural (magnetic storm, high-magnetized overlaying deposits) and anthropogenic (metal constructions — pipelines, ETL) noise.

Поступила 16 ноября 2018 г.

Принята к печати 12 декабря 2018 г.

Ключевые слова: георадиолокация, магнитометрия, полигонально-жильные льды.

На примере небольшого участка многолетнемерзлых отложений на острове Курунгнах в дельте р. Лены проведено сравнение эффективности методов магнитометрии и георадиолокации для картирования полигонально-жильных льдов едомного комплекса. Установлено, что оба метода сравнимы по эффективности и позволяют успешно решить задачу картирования при минимальной дополнительной обработке данных съемки. Показано, что метод магнитометрии является более оперативным в сравнении с методом георадиолокации. Отмечен ряд практических аспектов применимости методов в зависимости от наличия природных и техногенных факторов.

ВВЕДЕНИЕ

Картирование полигонально-жильных льдов является актуальной задачей при проведении научных и инженерных работ в криолитозоне. Точная информация о распределении льда в верхней части разреза позволяет оценить интенсивность возможной деградации многолетнемерзлых пород в силу природных и техногенных факторов, выявить участки с высоким потенциалом к образованию термоэрозии, обеспечить представительность данных при отборе проб с разных участков полигонально-жильной структуры [1–4].

Геофизические методы могут существенно облегчить задачу картирования полигонально-жильных структур криолитозоны, особенно если речь идет о сравнительно небольших участках (размером десятки и сотни метров) [5–9]. В некоторых случаях, если полигонально-жильные льды скрыты под слоем песка, снега или более молодых отложений, так что они не наблюдаются визуально даже при пристальном осмотре и анализе рельефа, геофизические методы становятся незаменимыми.

В настоящей работе приведены результаты применения двух методов — прецизионной магнитометрии и георадиолокации на участке едомного комплекса о. Курунгнах в дельте р. Лены. Едомные отложения на о. Курунгнах содержат крупные (до нескольких метров шириной) жилы льда, образующие полигональную структуру [10]. Подобные отложения широко распространены на обширных территориях Сибири, Чукотки и Аляски [11–16]. Магнитометрия и георадиолокация являются наиболее оперативными геофизическими методами исследования верхней части разреза многолетнемерзлых пород. Оба метода позволяют выполнять картирование жильных льдов, в том числе скрытых [5, 17–21]. В течение последнего года в двух диссертационных работах рассматривался вопрос применения для локализации жильных льдов метода георадиолокации [22] и прецизионной магнитной съемки [23]. В настоящей работе рассмотрены практические аспекты применения этих методов для картирования жильных льдов на примере небольшого участка едомных отложений.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок исследования расположен на поверхности едомного комплекса (также называемого «ледовый комплекс») вблизи термоэрозионного оврага на о. Курунгнах в дельте р. Лены (рис. 1).



Рис. 1. Спутниковый снимок участка исследований: слева — общий вид дельты р. Лены (<https://www.bing.com/maps>), справа — побережье о. Курунгнах (<https://wego.here.com>)

Fig. 1. Satellite image of the study area: left — general view of Lena river delta (<https://www.bing.com/maps>), right — coast of Kurungnakh island (<https://wego.here.com>)

Термоэрозионный овраг, активно развивающийся в глубь комплекса от берега, обнажает мощные ледовые жилы, которые, вероятно, определяют направление развития термоэрозии (рис. 2).



Рис. 2. Обнажение ледовой жилы в верхней части термоэрозионного оврага
Fig. 2. Outcrop of an ice wedge in the upper part of thermoerosional gully

Территория, включающая участок исследований, была покрыта аэрофотосъемкой с разрешением 3–5 см/пиксель в июле 2016 г. [24]. По материалам аэрофотосъемки методом фотограмметрии была построена цифровая модель рельефа с относительной погрешностью около 10 см. Этот материал был использован в настоящей работе в качестве основы, на которую были впоследствии наложены результаты геофизической съемки.

Георадиолокационная и магнитная съемки были выполнены в пределах участка, обозначенного на рис. 1. Пространственная привязка в пределах участка осуществлялась при помощи измерительной рулетки.

Магнитная съемка проводилась пешеходным магнитометром ММPOS-1, запись вариаций магнитного поля осуществлялась при помощи второго ММPOS-1 в режиме магнитовариационной станции. Магнитовариационная станция была установлена в 50 м к западу от участка съемки. Магнитные вариации были вычтены при обработке. Измерения проводились на высоте 2 м по равномерной сети с расстоянием 2 м между точками. Датчик был установлен на штангу высотой 2 м. Съемка выполнялась оператором и помощником, который удерживал штангу в вертикальном положении на расстоянии длины кабеля датчика (около 2 м) от оператора (это было сделано для минимизации помех, вносимых деталями преобразователя и регистратора, закрепленных на операторе). В процессе съемки измерялся модуль вектора магнитной индукции.

Георадиолокационная съемка была выполнена аппаратурой ОКО-2 по профилям с расстоянием 1 м между профилями и около 2 см между точками измерения вдоль профиля (это было реализовано при помощи колесного датчика перемещения). Измерения проводились с антенной 150 МГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фрагменты аэрофотоснимка и цифровой модели рельефа приведены на рисунках 3 а и 3 б соответственно.

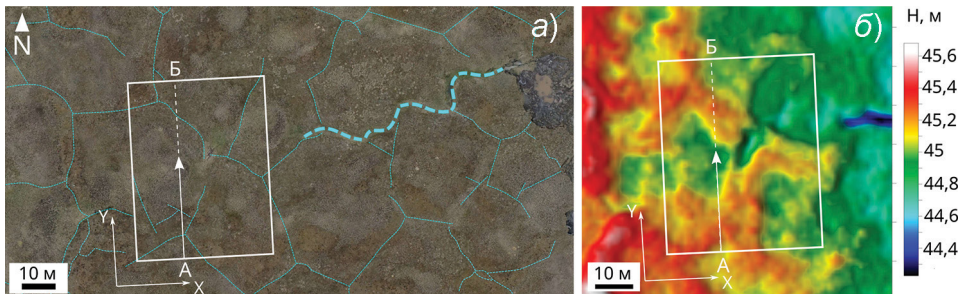


Рис. 3. Аэрофотоснимок 2016 года (а) и цифровая модель рельефа (б).

Белый прямоугольник оконтуривает участок съемки (40×50 м), профиль АБ (рассмотрен на рис. 4) расположен на 14 м по оси X (начало отсчета в левом нижнем углу прямоугольника), стрелкой указано направление движения георадара по профилю; голубой пунктир (а) маркирует морозобойные трещины, жирным пунктиром отмечена трещина, вдоль которой наиболее активно развивается термоэрозионный овраг (рис. 2)

Fig. 3. Aerial photo made in 2016 (a) and digital elevation model (b).

White rectangle marks the contour of study area (40×50 m), АБ profile (considered in fig. 4) is situated on 14 m of X axis (zero is in left lower corner of the rectangle), the arrow shows direction of ground-penetrating radar along the profile; blue dotted line (a) marks frost cracks, thick dotted line — the trench along which the thermoerosional gully develops in most intensive manner (fig. 2)

Морфология поверхности тундры на участке съемки (рис. 3 б) характеризуется небольшим (менее 1 м) перепадом высот (не считая оголовья термоэрозионного оврага в правой части рисунка). Наблюдается общий уклон поверхности в восточном направлении, вызванный, вероятно, вытаяванием ледового комплекса вдоль береговой линии. Локальные перепады высот в пределах участка составляют не более полуметра. Морозобойные трещины (рис. 3 а) образуют полигональную сеть, выраженную в рельефе (рис. 3 б) в виде «валиков», разделяющих полигоны. По своим размерам эта полигональная сеть соответствует размеру полигонов плейстоценовых сингенетических жильных льдов [10]. Плейстоценовые отложения на о. Курунгнах, представленные алевропесками и торфосодержащими алевритами [10] (мощностью около 20 м), перекрыты голоценовыми торфосодержащими алевритами [10] (мощностью около 0,7 м), которые в свою очередь содержат систему более мелких эпигенетических жил, внедряющихся в плейстоценовый ледовый комплекс. Голоценовые жилы повторяют сеть плейстоценовых жил, при этом разбивают ее дополнительно на ячейки меньшего размера. Наиболее заметны на поверхности те из трещин, под

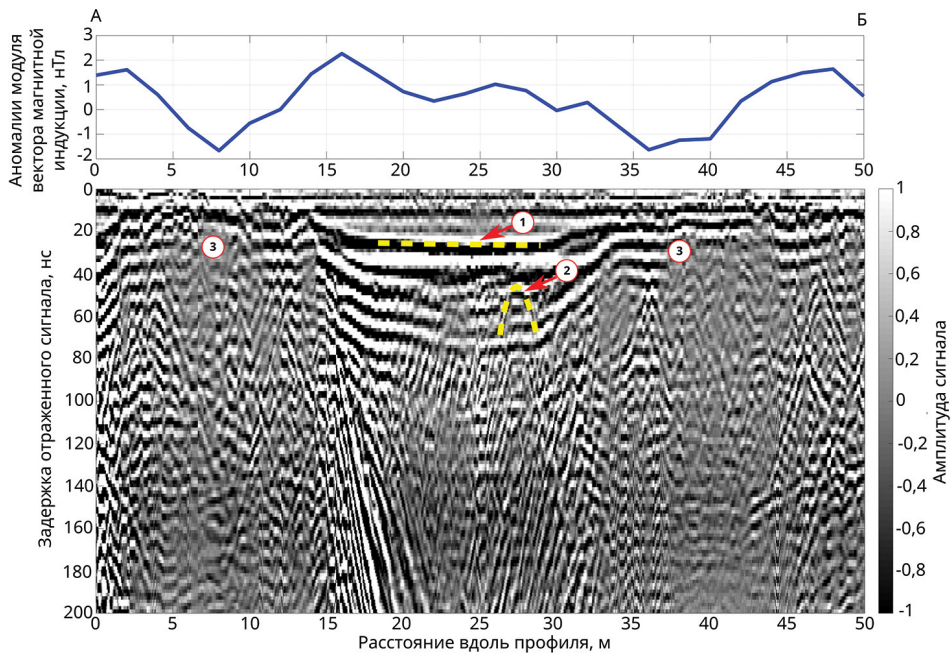


Рис. 4. Аномалии модуля вектора магнитной индукции (результат магнитной съемки) и волновая картина (результат георадиолокационной съемки) по профилю АБ (рис. 3).

Объекты, отмеченные цифрами в кружках: 1 — отражение от дна лужи; 2 — небольшой локальный объект, возможно, ледовая линза; 3 — места пересечения профиля с плейстоценовыми ледовыми жилами (рис. 3), здесь наблюдаются отрицательные магнитные аномалии (верхняя часть рисунка). На временах более 100 нс видны в основном кратные отраженные волны

Fig. 4. Anomalous total magnetic field (result of magnetic survey) and wave pattern (result of ground-penetrating radar survey) on АБ profile (fig. 3).

Objects marked by numbers in circles: 1 — reflection from the bottom of puddle; 2 — small local object, probably ice lense; 3 — sites where the profile crosses Pleistocene ice wedges (fig. 3), the negative magnetic anomalies are observable here (upper part of the figure). On the traveltimes of more than 100 ns mostly multiple waves are visible

которыми расположены плейстоценовые жилы. Мы предполагаем, что это происходит вследствие повышенной интенсивности морозного растрескивания над плейстоценовыми жилами, что в свою очередь может быть связано с создаваемой ими температурной неоднородностью в верхнем слое за счет отличий теплофизических свойств льда и мерзлых пород.

На рис. 4 приведены результаты магнитной и георадиолокационной съемки по профилю АБ (рис. 3), пересекающему две крупные плейстоценовые жилы.

Обработка данных магнитной съемки включала следующие шаги:

- учет вариаций магнитного поля (вычитание из данных съемки соответствующих значений, полученных при помощи магнитовариационной станции);
- приведение значений аномалий модуля вектора магнитной индукции к условному среднему уровню (в данном случае в качестве среднего было выбрано медианное значение по всему массиву данных).

Погрешность полученных значений аномалий F оценивалась на основании повторных контрольных измерений [18] и составила 0,3 нТл.

Исходная волновая картина, полученная при георадиолокационной съемке, малопредставительна в неизменном виде — амплитуда сигнала весьма быстро затухает с глубиной (соответственно с увеличением времени прихода отраженной волны). Поэтому для каждого времени прихода амплитуда сигналов была разделена на стандартное отклонение всех амплитуд, наблюдаемых в это время в разных точках вдоль профиля. Такая нормировка позволила отобразить отчетливую волновую картину для всех времен прихода в единой цветовой шкале.

Как видно из рис. 4, ледовым жилам соответствуют отрицательные магнитные аномалии, однако на волновой картине отчетливых аномалий на этих участках не проявляется. Можно отметить лишь вертикальные полосы с меньшей амплитудой (отметки с цифрой 3 на рис. 4), верхняя граница этих зон соответствует времени 20 нс, что соответствует глубине около 1 м (при диэлектрической проницаемости многолетнемерзлых пород равной 6 — среднее значение, полученное иностранными авторами для аналогичных пород в работах на Аляске [25]). Такая глубина верхних окончаний плейстоценовых жил соответствует геологическим представлениям о строении ледового комплекса [10]. Поскольку искомые объекты (жилы) имеют вертикальную протяженность, для их обнаружения целесообразным выглядит построение горизонтальных срезов массива данных георадиолокации. Схемы, приведенные на рис. 5, были получены в результате пересчета времен прихода в псевдоглубины, было принято среднее значение диэлектрической проницаемости мерзлых пород, равным 6. Значение амплитуды сигнала в каждой точке было преобразовано согласно выражению $A = \log_{10}(|Amp| + 1)$, где Amp — исходная амплитуда сигнала, — таким образом было получено значение интенсивности сигнала независимо от его знака.

Как видно из рисунка 5, ледовые жилы начинают уверенно просматриваться с глубины 3 м (рис. 5 б). Поверхность тундры на участке измерений сильно увлажнена, встречаются крупные лужи, создающие многократное отражение сигнала, что приводит к сильным помехам, особенно на ранних временах прихода волн (рис. 5 а). Этот эффект от луж просматривается даже на глубине 4 м в виде зон с наиболее высокой амплитудой сигнала (рис. 5 в). Помимо этого, источником помех служат, вероятно, неоднородности в приповерхностной части разреза — кочки,

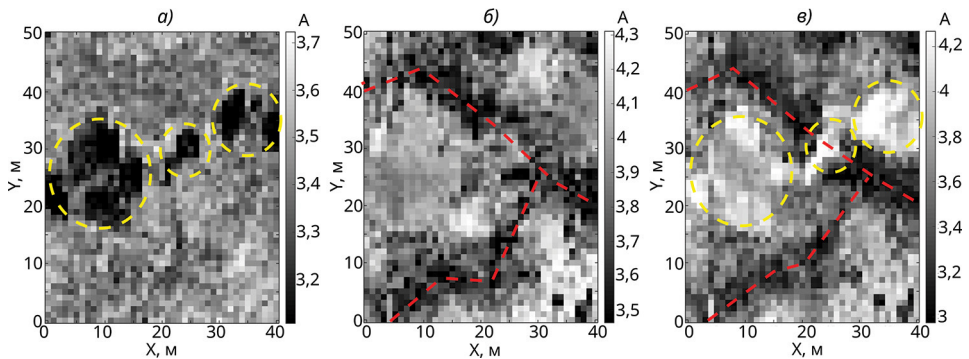


Рис. 5. Горизонтальные амплитудные срезы ($A = \log_{10}(|Amp| + 1)$, где Amp — исходная амплитуда сигнала) массива данных георадиолокационной съемки на псевдоглубинах 2 (а), 3 (б) и 4 (е) метра.

Желтым пунктиром (а, е) обведены зоны, в которых наблюдается отражение сигнала от воды в лужах; красным пунктиром (б, е) отмечены участки затухания сигнала, соответствующие ледовым жилам

Fig. 5. Horizontal amplitude slices ($A = \log_{10}(|Amp| + 1)$) of ground penetrating radar survey data array at the pseudodepths of 2 (a), 3 (б) and 4 (е) meters.

Yellow dotted line (a, e) encircle zones where a reflection from the water in puddles is observed; red dotted line (б, е) marks the areas of the signal decay which correspond to ice wedges

лужицы, следы криотурбации в окрестности морозобойных трещин. В работе [22] упоминаются аналогичные проблемы при применении георадиолокации для поиска скрытых ледовых жил.

Полученные данные были подвергнуты дополнительному сглаживанию — в каждой точке равномерной сети с шагом 1 м на псевдоглубине 3,5 м было рассчитано среднее арифметическое значение всех значений в окрестности этой точки с учетом расстояния при помощи весовой функции вида:

$$p = e^{-\left(\frac{r-r_0}{R/2}\right)^2},$$

где r — координаты точки массива данных, r_0 — точка сети; R — радиус окрестности (в данном случае — 1 м), в которой производится усреднение.

Для сравнения результаты магнитной и георадиолокационной съемок приведены на рис. 6.

Как видно из рисунка 6, в магнитном поле отчетливо просматривается полигональный рисунок, соответствующий ледовым жилам. Разница значений аномалий модуля вектора магнитной индукции над жилой и над центром полигона достигает 6 нТл.

Стоит отметить, что в магнитном поле не только выделяются крупные жилы, которые наблюдаются визуально на аэрофотоснимке (рис. 3) и в рельефе (рис. 4), но в пределах каждого полигона видны зоны отрицательных аномалий меньшего размера, связанные, по-видимому, с голоценовыми жилами.

В работе [21] в том же районе была показана эффективность прецизионной магнитной съемки для картирования ледовых жил, при этом съемка проводилась на высоте 1 м и по более детальной сети — 1 м между профилями и 10 см между точками измерений вдоль профиля. Как видно из приведенных в настоящей работе

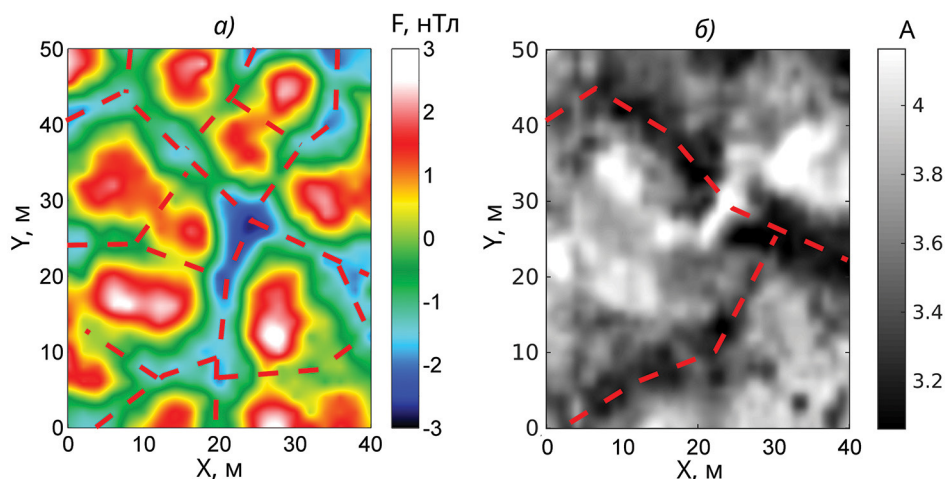


Рис. 6. Магнитные аномалии на высоте 2 м над поверхностью (а) и горизонтальный амплитудный срез на глубине 3,5 м по результатам георадиолокационной съемки (б), наложенные на аэрофотоснимок 2016 года.

ΔF — значение аномалии модуля вектора магнитной индукции; A — логарифм модуля амплитуды ($A = \log_{10}(|Amp| + 1)$, где Amp — амплитуда исходного сигнала) в безразмерных единицах; красным пунктиром отмечены участки, соответствующие ледовым жилам

Fig. 6. Magnetic anomalies on the elevation of 2 m above the surface (a) and horizontal amplitude slice at the depth of 3,5 m based on ground penetrating radar survey results (b) overlaying the aerial image made in 2016.

ΔF — value of total magnetic field anomaly; A — logarithm of amplitude module ($A = \log_{10}(|Amp| + 1)$, where Amp — amplitude of original signal) in dimensionless units; red dotted linemarks the areas which correspond to ice wedges

результатов — существенно более низкая детальность съемки тем не менее позволяет так же уверенно картировать ледовые жилы едомного комплекса, а также выявить сеть более мелких голоценовых жил. К практическим недостаткам метода можно отнести чувствительность метода к геомагнитной обстановке (в магнитоактивные дни съемка затруднена), сложность применения метода в условиях техногенных (при наличии в непосредственной близости трубопровода, ЛЭП и т.д.) и естественных (перекрывающие жилы отложения с высоким и неоднородным содержанием сильномагнитных песка или гальки) помех.

Метод георадиолокации позволяет весьма уверенно картировать относительно мощные (более 2 м шириной согласно оценкам [10]) плейстоценовые жилы ледового комплекса даже после минимальной обработки данных. Помимо этого, метод позволяет провести первичную оценку глубины верхних окончаний жил — на глубине 2 м жилы прослеживаются слабо (рис. 6 а), на 3 м — уверенно (рис. 6 б). К практическим недостаткам метода в данных условиях можно отнести необходимость контакта с поверхностью: для качественной съемки даже при благоприятных условиях (отсутствие кочек, кустов, крупных луж) приходится обеспечивать хорошее сцепление с поверхностью и выдерживать невысокую скорость перемещения, что снижает общую эффективность метода в сравнении с бесконтактными методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты демонстрируют применимость двух геофизических методов — магнитометрии и георадиолокации — при картировании полигонально-жильных льдов едомного комплекса. Оба метода позволили локализовать мощные (более 2 м шириной) плейстоценовые жилы ледового комплекса в пределах пробного участка. При этом магнитная съемка позволяет выявить также структуры меньшего размера — сеть голоценовых полигонально-жильных льдов, мощность которых варьируется от 0,5 до 1,5 м [10]. Георадиолокация позволила провести первичную оценку глубины верхних оконечностей плейстоценовых жил, которая составила около 1 м, что согласуется с геологическими данными [10]. Можно отметить, что в данных условиях метод магнитометрии существенно превышает метод георадиолокации по оперативности: например, при использовании квантового магнитометра с возможностью непрерывной регистрации с частотой 10 Гц участок, аналогичный приведенному в работе (размера 40×50 м), потребует от 30 до 60 минут для съемки, в то время как георадиолокационная съемка займет от одного до двух часов. Метод магнитометрии существенно менее требователен к рельефу поверхности, наличию кустов, луж и в ближайшем будущем может применяться на беспилотном аппарате-носителе, что существенно повысит его оперативность, *однако картирование столь слабых по амплитуде и мелких аномалий требует весьма высокой точности позиционирования датчика (в пределах 10 см [26])*. Метод георадиолокации в свою очередь позволяет проводить съемку в зонах с развитой инфраструктурой, обилием техногенных объектов, где магнитная съемка может быть сильно затруднена.

Благодарности. Исследования поддержаны: Проектом IX.128.3.3 Программы ФНИ СО РАН IX.128.3; Проектом II.61 Комплексной программы СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования».

Acknowledgements. Research is funded by: Project IX.128.3.3 of FSR SB RAS program IX.128.3; Project II.61 of Complex SB RAS program “Interdisciplinary integrative researches”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijma Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Reynolds M.K., Romanovsky V.E., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C.J., Yabuki H., Zonaet D. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9. № 4. P. 312.
2. Andersland O.B., Ladanyi B. *An Introduction to Frozen Ground Engineering*, 2nd edn. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 363 с.
3. Станюковская Ю.В., Мерзляков В.П. Вероятностная оценка опасности полигонально-жильных льдов для трубопроводов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2013. № 3. С. 48–54.

REFERENCES

1. Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijma Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Reynolds M.K., Romanovsky V.E., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C.J., Yabuki H., Zonaet D. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience*. 2016, 9, 4: 312.
2. Andersland O.B., Ladanyi B. *An Introduction to Frozen Ground Engineering*, 2nd edn. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004: 363 p.
3. Stanilovskaia Iu.V., Merzliakov V.P. Probabilistic assessment of the danger of polygonal ice wedges for pipelines. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov*. Science and technology of

4. Васильчук Ю.К. Повторно-жильные льды // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Т. 2. М.: ООО «Газпром эксп», 2013. С. 318–325.
5. Боголюбов А.Н., Боголюбова Н.П., Мозганова Е.Я. ПНИИИС. Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке. М.: Стройиздат, 1987. 88 с.
6. Scott W., Sellmann P., Hunter J. Geophysics in the study of permafrost // Geotechnical and Environmental Geophysics. Ward S. (Ed.) Society of Exploration Geophysics Tulsa. 1990. P. 355–384.
7. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 2007. 272 с.
8. Kneisel C., Hauck C., Fortier R., Moorman B. Advances in geophysical methods of permafrost investigations // Permafrost and Periglacial Processes. 2008. № 19. P. 157–178.
9. Hauck C., Kneisel C. Applied geophysics in periglacial environments. New York: Cambridge University Press. 2008. V. 240. 256 p.
10. Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A.A., Kienast F., Meyer H., Schirrmeister L., Kuznetsova T., Sierralta M. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, northeast Siberia, Russia // Quaternary Science Reviews. 2008. V. 27. № 15–16. P. 1523–1540.
11. Попов А.И. Подземный лед // Подземный лед. Вып. 1. М.: Изд-во МГУ, 1965. С. 7–39.
12. Каплина Т.Н. Зональные закономерности распространения полигонально-жильных образований в Восточной Сибири // Палеокриология в четвертичной стратиграфии и палеогеографии. М.: Наука, 1973. С. 38–50.
13. Соломатин В.И. Строение и генезис полигонально-жильного льда в плейстоценовых отложениях северной Якутии // Проблемы криолитологии. 1974. № 4. С. 7–99.
14. Washburn A.L. Geocryology – A Survey of Periglacial Processes and Environments. London, UK: Edward Arnold Ltd., 1979. 406 p.
- pipeline transportation of oil and petroleum products. 2013, 3: 48–54. [In Russian].
4. Vasil'chuk Yu.K. Povtorno-zhil'nye l'dy. Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenii poluoostrova Yamal. Kriosfera Bovanenskovoга нефтегазоконденсатного месторождения. Т. 2. Moscow: ООО «Gazprom eksp», 2013: 318–325. [In Russian].
5. Bogoliubov A.N., Bogoliubova N.P., Mozganova E.Ia. Rekomendatsii po kompleksirovaniu geofizicheskikh metodov pri merzlotnoi s'emke. PNIIS Recommendations on the integration of geophysical methods in cryogenic surveys. PNIIS. Moscow: Stroizdat, 1987: 88 p. [In Russian].
6. Scott W., Sellmann P., Hunter J. Geophysics in the study of permafrost. Geotechnical and Environmental Geophysics. Ward S. (Ed.) Society of Exploration Geophysics Tulsa. 1990: 355–384.
7. Zykov Yu.D. Geofizicheskie metody issledovaniia kriolitozony. Geophysical methods for cryolithozone study. Moscow: MSU publishing house, 2007: 272 p. [In Russian].
8. Kneisel C., Hauck C., Fortier R., Moorman B. Advances in geophysical methods of permafrost investigations. Permafrost and Periglacial Processes. 2008, 19: 157–178.
9. Hauck C., Kneisel C. Applied geophysics in periglacial environments. New York: Cambridge University Press. 2008, 240: 256 p.
10. Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A.A., Kienast F., Meyer H., Schirrmeister L., Kuznetsova T., Sierralta M. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, northeast Siberia, Russia. Quaternary Science Reviews. 2008, 27, 15–16: 1523–1540.
11. Popov A.I. Podzemnyi led. Subsurface ice. Moscow: MSU publishing house, 1965: 7–39. [In Russian].
12. Kaplina T.N. Zonal'nye zakonomernosti rasprostraneniia poligonal'no-zhil'nykh obrazovaniy v Vostochnoi Sibiri. Paleokriologiya v chetvertichnoi stratigrafii i paleogeografii. Zonal patterns of distribution of polygonal cavern-load formations in Eastern Siberia. Paleocryology in

15. *Tomirdiario S.V.* Лессово-ледовая формация Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене. М.: Наука, 1980. 185 с.
16. *Gilbert G.L., Kanevskiy M., Murton J.B.* Recent advances (2008–2015) in the study of ground ice and cryostratigraphy // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. V. 27. № 4. P. 377–389.
17. *Мельников В.П., Гладкий К.В., Лобанов А.М.* Влияние поверхностных геологических неоднородностей на изменения гравитационного и магнитного полей // *Обзорная информация. Разведочная геофизика*. 1974. № 64. С. 139–144.
18. Инструкция по магниторазведке: Наземная магнитная съемка. Аэромагнитная съемка. Гидромагнитная съемка / Под ред. Ю.С. Глебовского. Л.: Недра, 1981. 263 с.
19. *Arcone S.A.* Radar detection of ice wedges in Alaska. CRREL Report 82-43. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, 1982. 17 p.
20. *Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M.Z., Hinkel K.M., Nelson F.E., Jones B.M., Shur Y., Kimbleet J.M.* Application of ground penetrating radar imagery for three dimensional visualisation of near surface structures in ice rich permafrost, Barrow, Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2007. V. 18. № 4. P. 309–321.
21. *Tsibizov L., Rusalimova O.* Magnetic imaging of the Kurungnakh Island ice complex upper layer structure, Lena Delta, Russia // *Near Surface Geophysics*. 2017. V. 15. № 5. P. 527–532.
22. *Бричева С.С.* Разработка методики изучения криогенных объектов при помощи георадиолокации: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 2018. 25 с.
23. *Цибизов Л.В.* Аномалии магнитного поля над полигонально-жильными льдами (на примере ледового комплекса в дельте р. Лены): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН. Новосибирск, 2018. 24 с.
24. *Tsibizov L., Fage A., Rusalimova O., Fadeev D., Olenchenko V., Yeltsov I., Kashirtsev V.* Integrated non-invasive geophysical-soil studies of permafrost upper layer and aerial high-resolution photography // *Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2016, Quaternary stratigraphy and paleogeography*. Moscow: Nauka, 1973: 38–50. [In Russian].
13. *Solomatina V.I.* *Stroenie i genesis poligonal'no-zhil'nogo l'da v pleistotsenovykh otlozheniakh severnoi Iakutii.* Structure and genesis of polygonal cavern-load ice in the Pleistocene sediments of northern Yakutia. *Problemy kriolitologii*. Problems of cryolithology 1974, 4: 7–99. [In Russian].
14. *Washburn A.L.* *Geocryology – A Survey of Periglacial Processes and Environments*. London, UK: Edward Arnold Ltd., 1979: 406 p.
15. *Tomirdiario S.V.* *Lessovo-ledovaia formatsiia Vostochnoi Sibiri v pozdnem pleistotsene i golotsene.* Loess-Ice formation of Eastern Siberia in the Late Pleistocene and Holocene. Moscow: Nauka, 1980: 185 p. [In Russian].
16. *Gilbert G.L., Kanevskiy M., Murton J.B.* Recent advances (2008–2015) in the study of ground ice and cryostratigraphy. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016, 27, 4: 377–389.
17. *Mel'nikov V.P., Gladkii K.V., Lobanov A.M.* *Vliianie poverkhnostnykh geologicheskikh neodnorodnostei na izmeneniia gravitatsionnogo i magnitnogo poli.* *Obzornaia informatsiia. Razvedochnaia geofizika.* Influence of surface geological inhomogeneities on changes in the gravitational and magnetic fields. Survey information. Exploration Geophysics. 1974, 64: 139–144. [In Russian].
18. *Instruktsiia po magnitorazvedke: Nazemnaia magnitnaia s"emka. Aeromagnitnaia s"emka. Gidromagnitnaia s"emka. Magnetic Instruction: Ground Magnetic Survey. Aero magnetic shooting. Hydromagnetic shooting.* Ed. Yu.S. Glebovsky Leningrad: Nedra, 1981: 263 p. [In Russian].
19. *Arcone S.A.* Radar detection of ice wedges in Alaska. CRREL Report 82-43. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, 1982: 17 p.
20. *Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M.Z., Hinkel K.M., Nelson F.E., Jones B.M., Shur Y., Kimbleet J.M.* Application of ground penetrating radar imagery for three dimensional visualisation of near surface structures in ice rich permafrost, Barrow, Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2007, 18, 4: 309–321.
21. *Tsibizov L., Rusalimova O.* Magnetic imaging of the Kurungnakh Island ice complex upper

Berichte zur Polar- und Meeresforschung = Reports on polar and marine research, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. 2017. V. 709. P. 56–69.

25. Arcone S.A., Lawson D.E., Delaney, A.J., Strasser J. C., Strasser J.D. Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost // Geophysics. 1998. V. 63 (5). P. 1573–1584.

26. Цибизов Л.В. Повторно-жильные льды в аномальном магнитном поле: численное моделирование // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 2 (112). С. 75–84.

layer structure, Lena Delta, Russia. Near Surface Geophysics. 2017, 15, 5: 527–532.

22. Bricheva S.S. *Razrabotka metodiki izucheniya kriogennykh ob"ektov pri pomoshhi georadiolokatsii*. Development of cryogenic objects study method using ground penetrating radar. PhD thesis. Moscow state university, 2018: 25 p. [In Russian].

23. Tsibizov L.V. *Anomalii magnitnogo polya nad polygonal'no-zhil'nymi l'dami (na primere ledovogo kompleksa v del'te r. Leny)*. Magnetic field anomalies above polygonal-wedge ice (the case of ice complex in Lena delta). PhD thesis. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. Novosibirsk, 2018: 24 p. [In Russian].

24. Tsibizov L., Fage A., Rusalimova O., Fadeev D., Olenchenko V., Yeltsov I., Kashirtsev V. Integrated non-invasive geophysical-soil studies of permafrost upper layer and aerial high-resolution photography. Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2016, Berichte zur Polar- und Meeresforschung = Reports on polar and marine research, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. 2017, 709: 56–69.

25. Arcone, S.A., Lawson, D.E., Delaney, A.J., Strasser, J.C., Strasser, J.D. Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost. Geophysics. 1998. 63 (5): 1573–1584.

26. Tsibizov L.V. Ice wedges in anomalous magnetic field: numerical modeling. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 2 (112): 75–84.