

## ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫЕ ЛЬДЫ В АНОМАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Л.В. ЦИБИЗОВ<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> — *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru*

<sup>2</sup> — *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*

Повторно-жильные льды благодаря пониженному значению магнитной восприимчивости в сравнении с вмещающими их многолетнемерзлыми породами могут быть источниками отрицательных магнитных аномалий. Это делает возможным их картирование методом прецизионной магнитной съемки. В работе рассмотрены некоторые типичные модели полигонально-жильных структур криолитозоны. Рассчитаны аномалии модуля вектора магнитной индукции на высотах 1–5 м над уровнем верхней границы ледяных жил. Ширина жил варьируется в пределах от 1 до 3 м при размере полигонов от 6 до 15 м соответственно. Магнитная восприимчивость мерзлых грунтов считается равной  $10^{-3}$  СИ. Амплитуда расчетных аномалий составляет от нескольких единиц до нескольких десятков нТл. Приведенные оценки позволяют определить точность съемки, необходимую для картирования повторно-жильных льдов. В условиях относительной латеральной однородности перекрывающих осадков и магнитной восприимчивости мерзлых грунтов порядка  $10^{-3}$  СИ возможно уверенное выявление скрытых ледяных жил шириной более 3 м в аномальном магнитном поле при мощности перекрывающих отложений до 4 м.

*Ключевые слова:* многолетнемерзлые породы, магнитная съемка.

### ВВЕДЕНИЕ

Повторно-жильные льды (ПЖЛ) — ледяные полигонально-жильные структуры в криолитозоне, формирующиеся в результате многократного морозного растрескивания грунтов и заполнения трещин льдом (рис. 1). Для решения ряда инженерных и научных задач весьма актуальна информация о распределении ПЖЛ верхнем слое многолетнемерзлых отложений, наиболее подверженном воздействию природных и техногенных процессов. Гидрологические и климатические процессы в криолитозоне в существенной степени обуславливают деградацию многолетнемерзлых пород по ледяным жилам (Liljedahl et al., 2016). Кроме того, информация о расположении ледяных жил, скрытых под слоем осадков, крайне важна при проектировании объектов инфраструктуры (рис. 2) (Andersland, Ladanyi, 2013; Станиловская, Мерзляков, 2013; Васильчук, 2013).

Для решения подобных задач успешно применяются разнообразные геофизические методы (Рекомендации..., 1987; Scott et al., 1990; Зыков, 2007; Kneisel et al., 2008; Hauck, Kneisel, 2008), при этом значение магнитометрии среди них выглядит сильно недооцененным. Несмотря на то, что возможность обнаружения подземных



Рис. 1. Ледяные жилы в ледовом комплексе о. Курунгнах-Сисё в дельте р. Лены. Фото автора.



Рис. 2. Надземный трубопровод в Якутии, проложенный по территории с реликтовыми мощными повторно-жильными льдами. Фото А.Н. Федорова, Институт мерзлотоведения (Станиловская, Мерзляков, 2013).

льдов при помощи прецизионной магнитной съемки известна относительно давно (Рекомендации..., 1987; Scott et al., 1990), метод до сих пор не получил широкого распространения. Метод прецизионной магнитометрии, известный также как «микроманнитная съемка» (Lauterbach, 1953), представляет собой особо точные измерения приращений модуля вектора магнитной индукции на небольшой площади, гарантирующие уверенное выделение слабых аномалий, составляющих менее 10 нТл ( $1 \text{ нТл} = 10^{-9} \text{ Тл}$ , тесла — единица магнитной индукции в системе СИ).

Прецизионная магнитная съемка в начале своего развития отличалась высокой трудоемкостью и, вероятно, по этой причине редко применялась при исследованиях на значительных площадях. Современная магнитометрическая аппаратура позволяет производить прецизионную (с точностью порядка 1 нТл) съемку с весьма высокой скоростью. Примером тому может послужить ее широкое применение в археологии (Becker, Fassbinder, 2001; Kvamme, 2006), где она является одним из самых эффективных методов картирования слабых (несколько нТл) аномалий, вызванных нарушениями в осадочных отложениях на глубине первых метров. Эффективность магнитометрии при изучении особенностей строения почвенного слоя показана в диссертации М.В. Косныревой (2007). Имеются также зарубежные публикации по применению этого метода при почвенных обследованиях (Allred et al., 2008). Наиболее близким к теме исследования повторно-жильных льдов методом магнитометрии можно считать опыт археомагнитных исследований в криолитозоне, при котором было отмечено наличие аномалий, вероятно вызванных мерзлотными структурами (Hodgetts et al., 2011; Wolff, Urban, 2013; Landry et al., 2015).

Магнитная съемка имеет ряд преимуществ при изучении распределения льда в многолетнемерзлых отложениях в сравнении с широко применяемыми в настоящее время геофизическими методами. Среди них наибольшее распространение получили электротомография и георадиолокация, отличающиеся высокой скоростью съемки, незначительной зависимостью магнитных свойств многолетнемерзлых пород от их солёности и температурного состояния (факторов, существенно влияющих на электрические свойства пород), а также отсутствием необходимости контакта с поверхностью. Стоит также отметить, что развитие беспилотных магнитометрических технологий (Cunningham et al., 2016; Паршин и др., 2016) в скором времени, вероятно, позволит реализовать более высокую скорость съемки, особенно в условиях тундры — при пологом рельефе и нулевой залесенности. Перечисленное выше делает магнитометрию одним из весьма перспективных методов для исследования многолетнемерзлых пород.

Настоящая работа посвящена оценке магнитных аномалий над ледяными жилами различной конфигурации на основе численного моделирования. Рассмотрен ряд моделей повторно-жильных льдов, соответствующих полевым наблюдениям, и рассчитаны значения аномалий модуля вектора магнитной индукции над ними на разных высотах. Выполненные расчеты позволяют оценить необходимую точность магнитной съемки для выявления повторно-жильных льдов, скрытых под слоем осадков, при различных параметрах: ширине жил, размере полигонально-жильных структур, магнитной восприимчивости мерзлых грунтов и мощности слоя вышележащих отложений.

### МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численная модель многолетнемерзлых отложений, содержащих повторно-жильные льды, представляет собой участок полупространства с однородной положительной магнитной восприимчивостью (мерзлые грунты), разделенной прямоугольной решеткой с нулевой магнитной восприимчивостью (система ледяных жил) (рис. 3). Такая геометрия отвечает одному из простейших распределений подземного льда, наблюдаемому в природе в полярных районах (Liljedahl et al., 2016) и образующему хорошо известный полигональный рельеф (рис. 4).

Численное моделирование было выполнено методом конечных элементов в программном пакете *Comsol Multiphysics* v. 4.4. Подход к моделированию магнитных

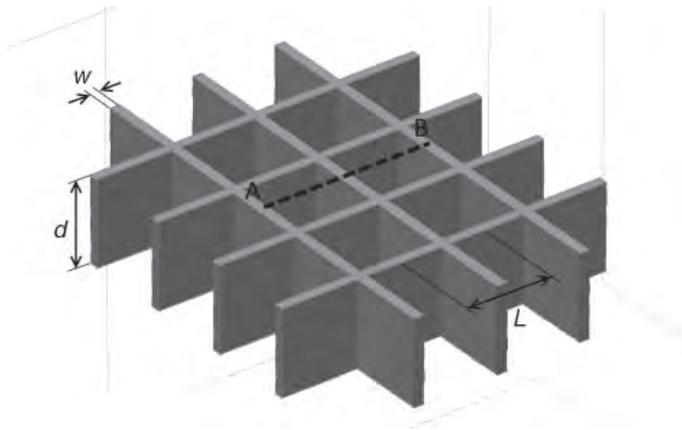


Рис. 3. Общий вид объемной модели полигонально-жильной структуры: серым цветом обозначены ледяные жилы, прозрачное заполнение между ними — мерзлый грунт;  $w$  — ширина жил,  $d$  — высота жил,  $L$  — расстояние между центрами полигонов;  $AB$  — линия профиля, на которой приводятся результаты расчета на рис. 5–8.

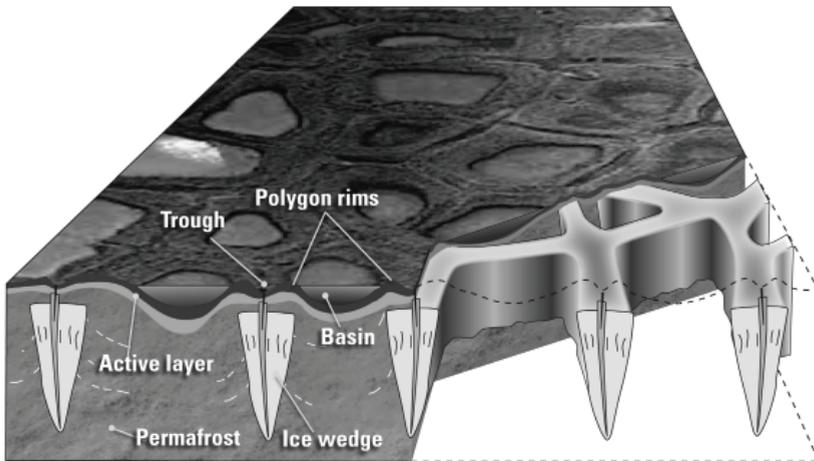


Рис. 4. Схема формирования полигонально-озерного рельефа (Martin et al., 2009).

аномалий в целом соответствовал описанному в работе (Butler, Sinha, 2012). Благодаря относительно низким значениям магнитной восприимчивости, а также пренебрегая остаточной намагниченностью материала и допуская однородное намагничение тел во внешнем поле, намагниченность можно записать в виде:

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu_0} K \cdot \vec{B}, \quad (1)$$

где  $K$  — магнитная восприимчивость,  $B$  — намагничивающее поле,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup>). Значение  $K$  для льда составляет около  $-10^{-5}$  СИ (Lonsdale, 1949) и в модели было принято равным 0.  $K$  мерзлых грунтов может варьироваться в довольно широких пределах в зависимости от концентрации в них ферромагнетиков. Типичные значения составляют  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  СИ (Бабанин, Трухин, 1995).

В настоящей работе расчеты были выполнены для значения  $K$  мерзлого грунта  $10^{-3}$  СИ. Вследствие линейности зависимости аномалии модуля вектора магнитной индукции от  $J$  источника полученные аномалии можно легко пересчитать для других значений  $K$ . Намагничивающее поле задано в модели вертикальным, поскольку криолитозона наиболее распространена в полярных районах, где вектор геомагнитного поля имеет наклонение  $80^\circ$  и более. Модуль вектора магнитной индукции намагничивающего поля в модели принят равным 60 000 нТл, что близко к типичным его значениям для полярных районов. Вектор магнитной индукции намагничивающего поля задан постоянным на всех внешних границах расчетной области. Размер расчетной области выбран так, чтобы влияние границы на расчет аномального поля вблизи объекта было пренебрежимо мало. Предварительные численные тесты показали, что при магнитной восприимчивости материала тестового объекта  $10^{-3}$  СИ соотношение 5:1 размера области ( $R$ ) к размеру объекта ( $s$ ) удовлетворяет этому условию: разница решений для соотношений  $R/s \geq 10:1$  и  $R/s = 5:1$  составляет менее 0,2 нТл на расстоянии 1 м над объектом.

О необходимости трехмерного моделирования таких структур свидетельствует сравнительный тест (рис. 5): аномальное магнитное поле над системой перпендикулярных жил и над одиночной жилой при ширине жил 5 м и расстоянии между полигонами 10 м отличается более чем на 20 %. При увеличении отношения ширины жил к размеру полигонов различие возрастает.

Слой осадков, перекрывающий ледяные жилы, рассматривается как слой постоянной мощности с однородной магнитной восприимчивостью. Это позволяет произвести вычитание этого слоя из модели, что приводит к сдвигу уровня нормального  $F$  на некоторую постоянную величину (что не сказывается на величине аномалий от ледяных жил). Таким образом, расчет аномалий  $F$  был выполнен на высотах от 1 до 5 м над верхней границей ледяных жил. Если считать, что высота магнитной съемки составляет 1 м над поверхностью, это соответствует мощности перекрывающего слоя от 0 до 4 м.

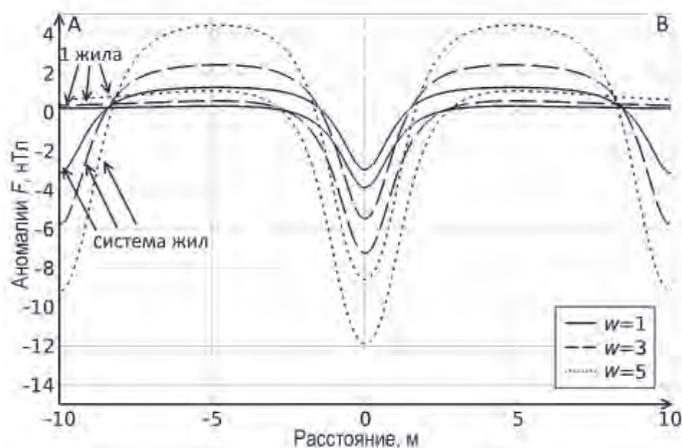


Рис. 5. Сравнение синтетических аномалий модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над одиночной жилой и над объемной полигонально-жилной структурой по профилю АВ (рис. 3) при различной ширине жил —  $w$ , высоте жил —  $d = 5$  м, расстоянии между центрами полигонов —  $L = 10$  м, магнитной восприимчивости мерзлого грунта —  $K = 10^{-3}$  СИ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Согласно опубликованным материалам, наиболее часто встречаются полигоны от 6–8 м до 15–20 м в диаметре. Мощность ледяных жил при этом может составлять 0,2–0,4 доли от их высоты (Дубиков, 1966; Washburn, 1979). Высота жил, в свою очередь, составляет 0,3–1 от расстояния между центрами полигонов. На основании этих данных рассмотрены две модели системы ледяных жил:

- модель 1: расстояние между жилами 6 м, высота жил 3 м и ширина 1 м;
- модель 2: расстояние между жилами 15 м, высота жил 10 м и ширина 3 м.

Отдельно было рассмотрено влияние формы верхних оконечностей жил на параметры магнитных аномалий. Различие формы верхних оконечностей ледяных жил

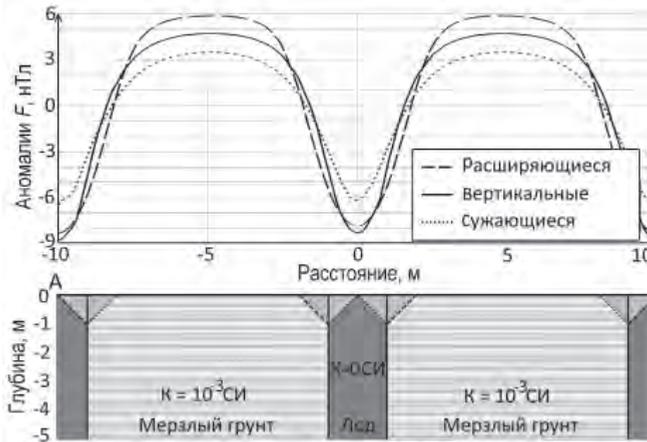


Рис. 6. Синтетические аномалии модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над полигонально-жильной структурой по профилю АВ (рис. 3) при различной форме жил в верхней части; ширина жил —  $w = 2$ , высота жил —  $d = 5$  м, расстояние между центрами полигонов —  $L = 10$  м, магнитная восприимчивость мерзлого грунта —  $K = 10^{-3}$  СИ.

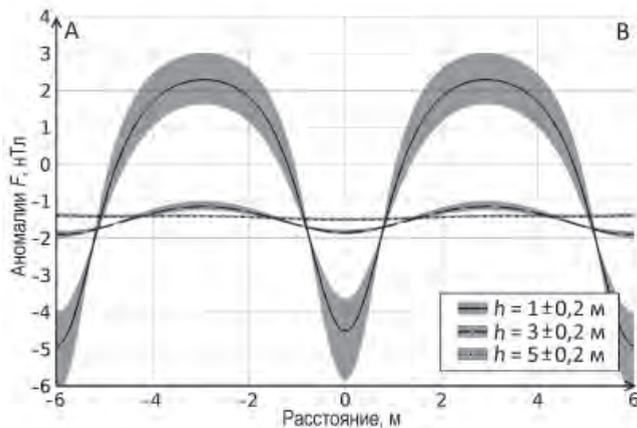


Рис. 7. Модель 1. Синтетические аномалии модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над полигонально-жильной структурой по профилю АВ (рис. 3) на разных высотах; ширина жил —  $w = 1$ , высота жил —  $d = 3$  м, расстояние между центрами полигонов —  $L = 6$  м, магнитная восприимчивость мерзлого грунта —  $K = 10^{-3}$  СИ; полупрозрачной областью отмечены зоны разброса значений  $F$  при отклонении высоты от указанной на  $\pm 0,2$  м.

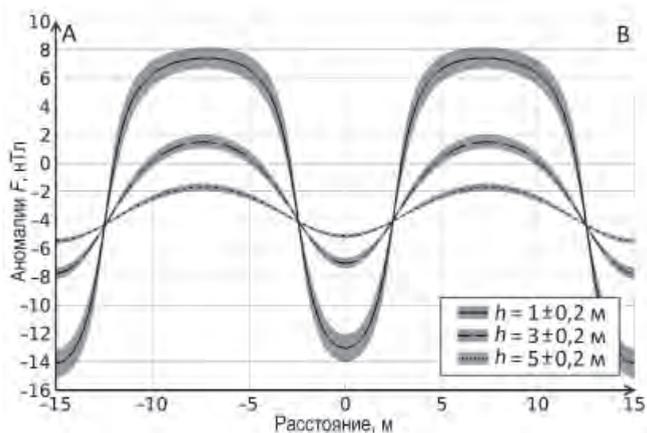


Рис. 8. Модель 2. Синтетические аномалии модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над полигонально-жильной структурой по профилю АВ (рис. 3) на разных высотах; ширина жил —  $w = 3$ , высота жил —  $d = 10$  м, расстояние между центрами полигонов —  $L = 15$  м, магнитная восприимчивость мерзлого грунта —  $K = 10^{-3}$  СИ; полупрозрачной областью отмечены зоны разброса значений  $F$  при отклонении высоты от указанной на  $\pm 0,2$  м.

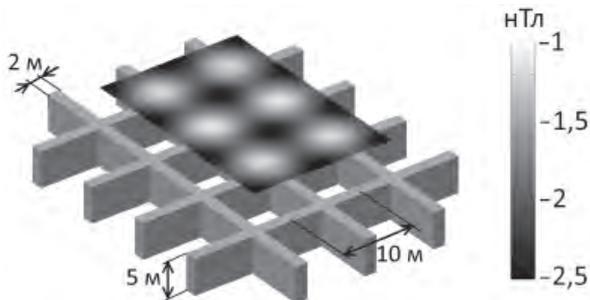


Рис. 9. Пример синтетического распределения аномального модуля вектора магнитной индукции ( $F$ ) над полигонально-жильной структурой на высоте 3 м; ширина жил —  $w = 2$ , высота жил —  $d = 5$  м, расстояние между центрами полигонов —  $L = 10$  м, магнитная восприимчивость мерзлого грунта —  $K = 10^{-3}$  СИ.

часто наблюдается в природе и зависит от условий их формирования (Washburn, 1979). Как видно из рис. 6, различие формы верхней границы незначительно влияет на ширину аномалий, при этом весьма существенно сказывается на их амплитуде (до 30 % разницы при сравнении случаев сужающихся и расширяющихся жил). В расчетах моделей 1 и 2 форма верхних границ ледяных жил была принята вертикальной. Результаты расчетов аномалий модуля вектора магнитной индукции на разных высотах приведены на рис. 7, 8.

На основании приведенных результатов расчетов можно заключить, что с учетом точности современной магнитометрической аппаратуры повторно-жильные льды могут быть уверенно выделены методом прецизионной магнитной съемки на высоте 1 м над уровнем верхней границы жил. На высоте 3 м выделение аномалий, связанных с жилами, возможно только при весьма низком (менее 0,5 нТл) уровне помех (в том числе вызванных неоднородностью вышележащего слоя). В модели 2 магнитные аномалии, превышающие 1 нТл, отчетливо прослеживаются до высоты 5 м над верхней границей жил. На высоте 1 м аномалии превышают 20 нТл, т.е. повторно-жильные льды такой геометрии могут

быть выявлены даже при значительно меньшем значении магнитной восприимчивости среды. Например, при  $K = 10^{-4}$  СИ аномалии превысят 2 нТл. На рис. 9 приведена ожидаемая картина распределения магнитных аномалий на высоте 3 м, которая может быть построена по площадной сети измерений модуля вектора магнитной индукции над повторно-жильными льдами с параметрами, промежуточными для моделей 1 и 2: шириной жил 2 м, высотой 5 м и расстоянием между центрами полигонов 10 м при магнитной восприимчивости мерзлого грунта  $10^{-3}$  СИ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аномалии модуля вектора магнитной индукции на высотах нескольких метров над повторно-жильными льдами могут составлять единицы и первые десятки нТл в зависимости от размеров жил и магнитной восприимчивости вмещающих их мерзлых грунтов. Современная магнитометрическая аппаратура позволяет уверенно выделять такие аномалии, что дает возможность картировать методом наземной магнитной или низковысотной аэромагнитной съемки ледяные жилы, скрытые под слоем осадков мощностью до нескольких метров. Следует также отметить возможность применения для этой цели вертикального градиентометра, так как разница между рассчитанными значениями модуля вектора магнитной индукции в рассмотренных типичных случаях составляет несколько нТл на 2 м. Перспективным выглядит совмещение прецизионной магнитной съемки с электрическими и электромагнитными методами, поскольку сходные ледяные тела при различной температуре будут источниками близких по форме и величине магнитных аномалий, но при этом могут существенно различаться по электрическим свойствам. Метод магнитной съемки благодаря своим техническим преимуществам — скорости съемки и отсутствию необходимости прямого контакта с поверхностью — может занять важное место в комплексе методов исследований криолитозоны и эффективно решать задачи мерзлотной съемки, связанные с картированием распределения льда в верхнем слое многолетнемерзлых отложений.

*Автор благодарит информационно-вычислительный центр Новосибирского государственного университета за предоставленные вычислительные ресурсы.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабанин В.Ф. Трухин В.И. и др.* Магнетизм почв. Ярославль: Типография ЯГТУ, 1995. 222 с.
- Васильчук Ю.К.* Повторно-жильные льды // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Т. 2. М.: ООО «Газпром экспо», 2013. С. 318–325.
- Васильчук Г. И.* Повторно-жильные льды Западной Сибири // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1966. № 5. С. 104–112.
- Коснырева М.В.* Разработка комплекса геофизических методов для решения прикладных задач почвенного картирования: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2007. 135 с.
- Зыков Ю.Д.* Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2007. 272 с.
- Паршин А.В. и др.* Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 144–149.
- Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке / ПНИИИС М.: Стройиздат, 1987. 88 с.

Станиловская 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.

Alfred B.J., Daniels J.J., Reza Ehsani M. (ed.). Handbook of agricultural geophysics. CRC Press, 2008. 432 p.

Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science & Business Media, 2013. 352 p.

Becker H., Fassbinder J.W.E. Magnetic Prospecting in Archaeological Sites. Monuments and Sites VI. ICOMOS. 2001. 104 p.

Butler S.L., Sinha G. Forward modeling of applied geophysics methods using Comsol and comparison with analytical and laboratory analog models // Computational Geosciences. 2012. № 42. P. 168–176.

Cunningham M. et al. An experimental aeromagnetic survey with a rotary-wing unmanned aircraft system // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2016. P. 2129–2133.

Hauck C., Kneisel C. (Eds.). Applied geophysics in periglacial environments. Cambridge University Press, 2008. Vol. 240. 238 p.

Hodgetts L., Dawson P., Eastaugh E. Archaeological magnetometry in an Arctic setting: a case study from Maguse Lake, Nunavut // Journal of Archaeological Sciences. 2011. № 38. P. 1754–1762.

Kneisel C., Hauck C., Fortier R., Moorman B. Advances in geophysical methods of permafrost investigations // Permafrost and Periglacial Processes. 2008. № 19. P. 157–178.

Kvamme K.L. Magnetometry: Nature's gift to archaeology // Johnson, J.K. (ed.). Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective. University of Alabama Press, Tuscaloosa, 2008. P. 205–234.

Landry D.B., Ferguson I.J., Milne I.J., Park R.W. Combined Geophysical Approach in a Complex Arctic Archaeological Environment: A Case Study from the LdFa-1 Site, Southern Baffin Island, Nunavut // Archaeological Prospection. 2015. № 22. P. 157–170.

Lauterbach R. Mikromagnetik-ein Hilfsmittel geologischer Erkundung // Wiss. Zeitschr. Univ. Leipzig. 1953. T. 3. S. 54.

Lonsdale K. Diamagnetic susceptibility and anisotropy of ice // Nature. 1949. № 164. P. 101.

Scott W., Sellmann P., Hunter J. Geophysics in the study of permafrost // Ward, S. (Ed.) Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysics Tulsa. 1990. P. 355–384.

Martin P., Jenkin J., Adams F., Jorgenson M., Matz A., Payer D., Reynolds P., Tidwell A., Zelenak J. Wildlife Response to Environmental Arctic Change: Predicting Future Habitats of Arctic Alaska // Report of the Wildlife Response to Environmental Arctic Change (WildREACH): Predicting Future Habitats of Arctic Alaska Workshop, 17–18 November 2008. Fairbanks, Alaska: U.S. Fish and Wildlife Service, 2009. 138 p.

Washburn A.L. Geocryology – A Survey of Periglacial Processes and Environments. London, UK: Edward Arnold Ltd., 1979. P. 406.

Wolff C.B., Urban T.M. Geophysical analysis at the Old Whaling site, Cape Krusenstern, Alaska, reveals the possible impact of permafrost loss on archaeological interpretation // Polar Research. 2013. № 32. P. 1–12.

L. V. TSIBIZOV

## ICE WEDGES IN ANOMALOUS MAGNETIC FIELD: NUMERICAL MODELING

Ice wedges could be sources of negative magnetic anomalies due to their low magnetic susceptibility in comparison with surrounding frozen ground. This allows their mapping using high-

precision magnetic survey. The work dedicated to analyze of typical models of polygonal-wedge structures in cryolithic zone. Total magnetic field anomalies are calculated at elevations of 1–5 m above the ice wedges upper boundary level. Ice wedge width varies from 1 to 3 m while polygon sizes vary from 6 to 15 m, respectively. Magnetic susceptibility of frozen ground assumed equal to  $10^{-3}$  SI. Calculated anomalies magnitude amounts from several nT to several tens of nT. Provided estimations allows defining a necessary survey precision for ice wedge mapping. Ice wedges more than 3 m wide are observable in anomalous magnetic field even in the case of covering deposits thickness of up to 4 m on the condition that covering layers are laterally relatively uniform and magnetic susceptibility of frozen ground is about  $10^{-3}$  SI.

*Keywords:* permafrost, magnetic survey.