

Геокриология

УДК 550.361

DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-45-54

Особенности геотемпературного поля и залегания многолетнемерзлой толщи Вилуйской синеклизы

В.П. Семенов, М.Н. Железняк

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
semenov.vp@rambler.ru*

Аннотация. На основании геотермических измерений и интерпретации данных стандартного каротажа скважин по 46 разведочным площадям (112 глубоких скважин) выполнен анализ и дана оценка особенностей залегания и мощности многолетнемерзлой толщи в пределах Вилуйской синеклизы. Выявлена значительная неоднородность геотемпературного поля, отмечающаяся интервалами с различным значением и направлением геотермического градиента. Установлено, что мощность многолетнемерзлой толщи в пределах структуры варьирует от 45 до 820 м, и даже в пределах отдельных месторождений амплитуда колебаний подошвы многолетнемерзлой толщи может достигать 200 м. На основании полученных исследований выделены 3 области, отличающиеся особенностями залегания мерзлых толщ. Составлены карты залегания нижней границы многолетнемерзлой толщи и серия мерзлотно-геотермических разрезов отдельных площадей и синеклизы в целом.

Ключевые слова: Вилуйская синеклиза, многолетнемерзлая толща, мощность многолетнемерзлой толщи, температура горных пород, геотермический градиент, внутриземный тепловой поток, мерзлотно-геотермический разрез, геологоразведочная площадь.

Благодарности. Работа выполнена в рамках бюджетного проекта IX.135.2. «Геотемпературное поле и трансформация криолитозоны Северной Азии и горных областей Центральной Азии» и интеграционного проекта СО РАН «Палеорекострукция теплового поля и криолитозоны Вилуйской синеклизы в позднем плейстоцене–голоцене».

DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-45-54

Features of geotemperature field and occurrence of permafrost section of Vilyui syncline

V.P. Semenov, M.N. Zheleznyak

*P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
semenov.vp@rambler.ru*

Abstract. In the paper, an analysis is carried out and evaluation of features of occurrence and thickness of permafrost section within the Vilyui syncline is given on the basis of geothermal measurements and interpretation of standard well logging data on 46 exploration areas (112 deep wells). A significant heterogeneity of a geotemperature field, marked by intervals with different values and directions of a geothermal gradient is revealed. It is established that the thickness of the permafrost section within the structure varies from 45 to 820 m, and even within individual deposits, an amplitude of oscillations of a bottom of the permafrost section can reach 200 m. On the basis of the obtained studies, 3 regions are distinguished, differing by the features of the occurrence of the permafrost. Maps of the occurrence of a permafrost base and a series of the permafrost geothermal structures of the individual areas and the syncline as a whole have been compiled.

Key words: Vilyui syncline, permafrost section, thickness of permafrost section, temperature of rocks, geothermal gradient, intraterrestrial heat flow, permafrost geothermal structure, geological exploration area.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of budget project IX.135.2. «Geotemperature field and transformation of cryolithozone of North Asia and mountain regions of Central Asia» and the integration Project of the SB RAS «Paleoreconstruction of thermal field and cryolithozone of Vilyui syncline in Late Pleistocene – Holocene».

Введение

Виллойская синеклиза по высокой концентрации углеводородных природных ресурсов и их экономической значимости принадлежит к числу важнейших регионов Дальнего Востока России. В настоящее время в пределах синеклизы открыты 11 углеводородных месторождений, часть из которых находятся в промышленной разработке. Помимо углеводородных месторождений, территория относится к Ленскому угольному бассейну с большим количеством месторождений угля, а западная часть структуры богата месторождениями каменной соли.

Месторождения полезных ископаемых и их проявления сосредоточены в суровых природно-климатических условиях на территории со сплошным распространением нестационарных многолетнемерзлых толщ (ММТ). Для выбора оптимальных методов строительства линейных, промышленных и гражданских сооружений, определения технологии и техники разработки месторождений необходимо знать параметры геотемпературного поля горных пород и особенности залегания ММТ на рассматриваемой территории. Рассмотрению этих крайне важных в научном и практическом отношении аспектов и направлена настоящая работа.

Природные условия

Виллойская синеклиза расположена в центрально-восточной части Сибирской платформы. В административном отношении она относится к Сунтарскому, Нюрбинскому, Верхневиллойскому, Виллойскому, Кобяйскому и Горному улусам Республики Саха (Якутия). В геоморфологическом плане территория большей своей частью приурочена к Центрально-Якутской аккумулятивной равнине, которая подразделяется на два уровня: на более древнюю возвышенную (с абс. отм. от 200 до 400 м) и на более молодую пониженную поверхность террас рек Лены, Вилюя и их притоков (60–200 м) [1].

Климат района резко континентальный, с антициклональным режимом атмосферной циркуляции, способствующим развитию температурной инверсии и формированию низких средних годовых температур воздуха, которые изменяются от $-7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ в западной части территории до $-11,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в восточной. Годовое количество атмосферных осадков варьирует от 257 до 354 мм [2]. Низкая средняя годовая температура пород в сочетании с отрицательным радиационным балансом обуславливает промерзание верхних горизонтов литосферы и формирование многолетнемерзлых толщ [3].

В геологическом отношении по структурно-формационным признакам и составу отложений

осадочный чехол изучаемой территории разбивается на три толщи. По составу пород отложения преимущественно представлены песками, песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов, реже известняков и доломитов [4].

По особенностям современного строения и тектонического развития Виллойская синеклиза разделяется на западную и восточную части, разделенные Тюкян-Чебыдинской моноклиной (рис.1).

Материал и методика

В основу настоящей публикации положены геотермические данные, полученные начиная с 1950-х годов и по настоящее время большим коллективом исследователей из Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. С 2009 г. сотрудниками лаборатории геотермии криолитозоны этого института были выполнены геотермические измерения на геологоразведочных площадях и месторождениях в глубоких (до 1200 м) скважинах. Эти исследования включали в себя как разовые, так и повторные геотермические замеры.

Опорным методом для определения мощности многолетнемерзлой толщи являлся метод температурных замеров в стволе скважины с выстоявшимся температурным режимом. Температурные измерения в глубоких геологоразведочных скважинах проводились точечным методом, а до глубины 30 м многоточечными установками [5]. При проведении исследований по оценке мощности многолетнемерзлой толщи нами использовались также данные стандартного каротажа скважин (термокартаж, кавернометрия, КС, ПС и др.), методика интерпретации которых рассмотрена в работах Б.В. Володько [6], М.Н. Железняк [7] и др.

Перечисленные выше скважинные геофизические методы по оценке мощности ММТ в пределах Виллойской синеклизы показали избирательную возможность их применения в зависимости от геологического разреза скважины и условий её проходки. При оценке мощности ММТ и положения нижней её границы в пределах отдельных площадей, помимо геотермических исследований, использовались работы В.С. Якупова [8], В.М. Калинина [9] и др. по оценке глубины залегания ММТ методом ВЭЗ. Эти данные о мощности ММТ не всегда совпадали с полученными нами в ходе геотермических исследований значениями, однако при комплексной оценке характеризуют некоторые особенности распространения нижней границы ММТ в пределах отдельных локальных структур.

Таким образом, мощность ММТ была определена в 112 глубоких скважинах гео-

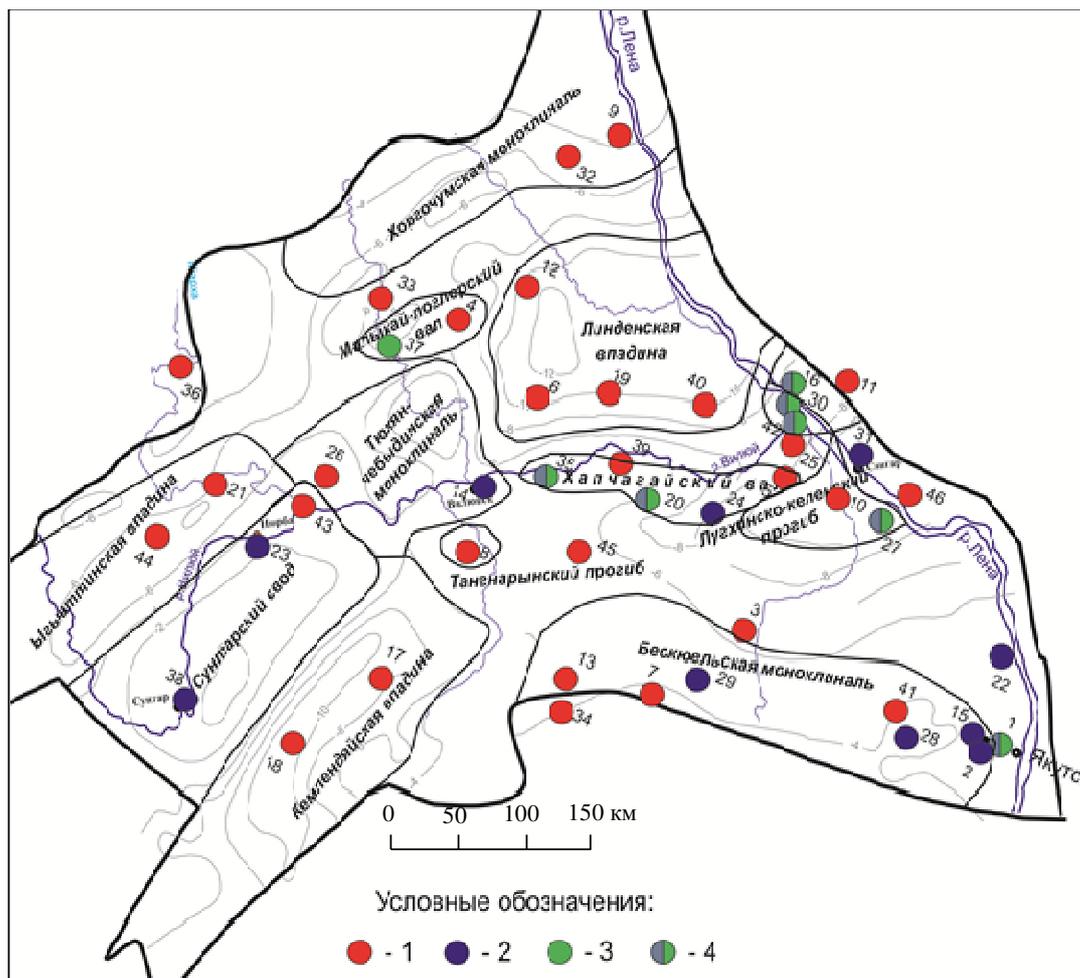


Рис.1. Схема пунктов определения мощности многолетнемерзлой толщи в пределах Вилуйской синеклизы:

1–4 – геологоразведочные площади, на которых получена информация о мощности ММТ: 1 – по данным стандартного каротажа скважин, 2 – по геотермическим исследованиям в 1970–1980 гг., 3 – по геотермическим исследованиям в 2009–2016 гг., 4 – по геотермическим исследованиям в 1970–1980 гг. и 2009–2016 гг.

Fig. 1. Scheme of points of determination of thickness of permafrost section within Vilyui syneclyse:

1–4 – geological exploration areas where information on thickness of permafrost section (PFS) was obtained: 1 – according to standard well logging data, 2 – for geothermal studies in 1970–1980, 3 – for geothermal studies in 2009–2016, 4 – for geothermal studies in 1970–1980 and in 2009–2016

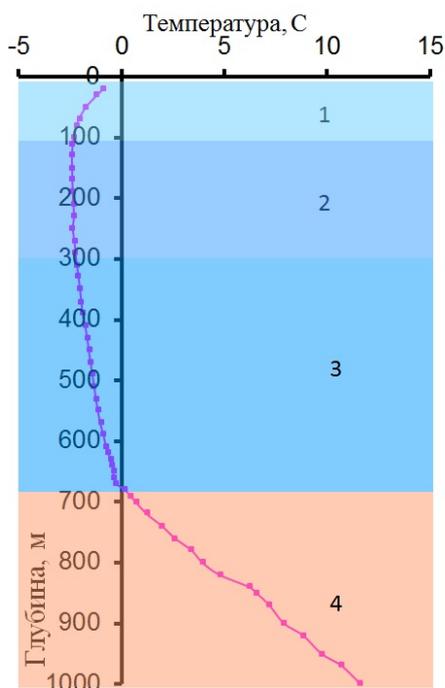
термическими измерениями и по данным термокаротажа, охватившими всю мерзлую толщу рассматриваемого региона (рис.1).

Результаты и обсуждение

Согласно мерзлотно-ландшафтному районированию [10], территория Вилуйской синеклизы приурочена к Верхневилуйской стволостанцовой, Тунгусско-Ботубобинской ступенчато-грядовой, Средневилуйской пологоувалистой и Вилуйской аласной провинциям со сплошным распространением многолетнемерзлых пород. Так, по имеющимся данным, температура горных пород в пределах Вилуйской синеклизы изменяется в широких пределах от $-0,5$ до $-9,0$ °C ввиду разнообразия климатических и геоморфологических особенностей рассматриваемой территории. Это обуславливается в большей степе-

ни типами местности и растительностью в сочетании с литологическими особенностями и в меньшей степени зависит от географического положения участка. Наиболее холодные области характерны для склонов северной экспозиции, подножий этих склонов и днищ долин мелких рек. К теплым областям относятся водоразделы и приводораздельные области, плакоры, а также пологие склоны южной экспозиции [11].

Проведенными геотермическими исследованиями подтвержден нестационарный характер ММТ в пределах синеклизы [12]. Нестационарность многолетнемерзлой толщи определяется разностью тепловых потоков в мерзлоте (q_m) и подмерзлотном горизонте (q_t). Величина внутриземного теплового потока в подмерзлотном горизонте варьирует от 40 до 68 мВт/м² [13]. Так при $q_t > q_m$ существует нестационарная



Площадь (скважина)	I зона, м	II зона, м	III зона, м	IV зона, м
Средне-Тюнгская (225)	20–130 (110)	30–190 (160)	190–670 (480)	680–1000 (320)
Средне-Тюнгская (231)	20–100 (80)	100–230 (130)	230–570 (340)	580–790 (210)
Средне-Виллойская (28)	20–80 (60)	80–100 (20)	100–620 (510)	630–1200 (570)
Средне-Виллойская (29)	20–80 (60)	80–110 (30)	110–590 (480)	600–1200 (600)
Средне-Виллойская (50)	20–70 (50)	70–90 (20)	90–510 (420)	520–900 (380)
Мастахская (66)	20–80 (60)	80–100 (20)	100–570 (470)	580–1200 (620)
Мастахская (68)	10–50 (40)	50–90 (40)	90–610 (520)	620–1200 (580)
Усть-Виллойская (5)	20–50 (30)	50–70 (20)	70–140 (70)	150–950 (800)

Рис. 2. Характер температурных кривых по скважинам:

1 – с отрицательным геотермическим градиентом (g) величиной от 0,15 до 5,3 °C/100 м, мощность которого изменяется от 30 до 210 м; 2 – безградиентный или слабоградиентный с g до 0,3 °C/100 м и мощностью горизонта от 20 до 160 м; 3 – с положительным градиентом в толще мерзлых пород с g от 0,4 до 2,0 °C/100 м мощностью от 80 до 480 м; 4 – с положительным градиентом в подмерзлотном горизонте, значения которого варьируют от 2,2 до 3,6 °C/100 м [16]

Fig. 2. Character of temperature curves for wells:

1 – with negative geothermal gradient (g) with value from 0.15 to 5.3 °C/100 m, thickness of which varies from 30 to 210 m; 2 – gradientless or low-gradient with g to 0.3 °C/100 m and horizon thickness from 20 to 160 m; 3 – with positive gradient in thickness of permafrost with g from 0.4 to 2.0 °C/100 m with thickness from 80 to 480 m; 4 – with positive gradient in subpermafrost horizon, values of which vary from 2.2 to 3.6 °C/100 m [16]

мерзлая толща, оттаивающая снизу. Скорость оттаивания такой толщи зависит от разницы тепловых потоков и влагоемкости (льдистости) пород [14], составляя для рассматриваемой территории в среднем 1,9 см/год [15]. При этом минимальные значения температуры горных пород, в большей части структуры, фиксируются на глубинах 60–130 м. Температура в пределах различных структур на глубине 20 м варьирует от –0,5 (пл. Сабо-Хаинская) до –2,7 °C (пл. Олойская), на глубине 500 м она изменяется от –1,4 (пл. Средне-Тюнгская) до 13,7 °C (пл. Сабо-Хаинская), а на глубине 1000 м от 11,6 (пл. Средне-Виллойская) до 17,6 °C (пл. Мастахская) [13]. В характере температурных кривых выделяются четыре интервала, отличающиеся величиной и знаком геотермического градиента (рис. 2).

Такие температурные кривые многолетнемерзлых толщ получены нами на большей части рассматриваемой территории. Это указывает на повышение температуры горных пород в верхней части разреза за последние 10 тыс. лет и на деградиционный режим многолетнемерзлой толщи под воздействием тепловых потоков, как приходящего из атмосферы, так и внутриземно-

го. В связи с этим прогнозные оценки мощности мерзлой толщи по температуре горных пород на глубине годовых теплооборотов являются ошибочными.

Помимо вышеперечисленных интервалов с различным геотермическим градиентом, нами было установлено, что в центральной и северо-западной частях синеклизы, где мощность ММТ достигает 400 м и более, на ее подошве отмечается безградиентная зона, мощность которой достигает 50 м. В восточной части, где мощность ММТ составляет менее 150 м, такая зона не выделяется. Наличие подобных безградиентных зон с температурой, близкой к 0 °C, связано с процессами фазового перехода воды в породах с высокой льдистостью.

По имеющимся и полученным данным о мощности многолетнемерзлой толщи в пределах исследуемой территории авторами составлена карта залегания её нижней границы (рис. 3) и построена серия мерзлотно-геотермических разрезов (рис. 4), которые характеризуют температурное поле и особенности залегания многолетнемерзлой толщи в пределах отдельных структур и Виллойской синеклизы в целом.

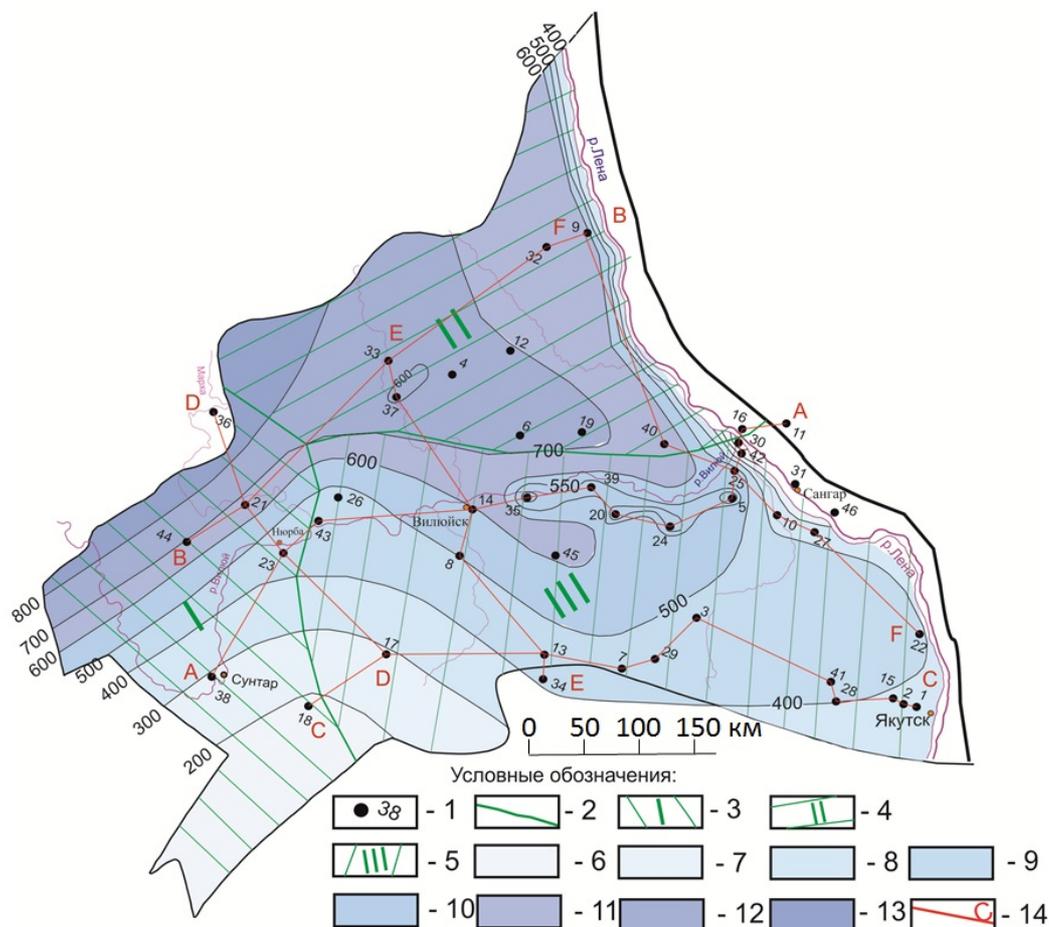


Рис. 3. Карта глубины залегания нижней границы многолетнемерзлой толщи Вилуйской синеклизы: 1 – геологоразведочная площадь, ее номер; 2 – граница областей распространения ММТ; 3–5 – области распространения ММТ: 3 – I, 4 – II, 5 – III; 6–13 – мощности ММТ: 6 – до 200 м, 7 – 200–300 м, 8 – 300–400 м, 9 – 400–500 м, 10 – 500–600 м, 11 – 600–700 м, 12 – 700–800 м, 13 – более 800 м; 14 – линии мерзлотно-геотермических разрезов

Fig. 3. Map of depth of occurrence of permafrost base of Vilyui syncline: 1 – geological exploration area, its number; 2 – border of areas of distribution of PFS; 3 – I area of distribution of PFS; 4 – II area of distribution of PFS; 5 – III area of distribution of PFS; 6 – thickness of PFS from 200 to 300 m; 7 – thickness of PFS from 300 to 400 m; 8 – thickness of PFS from 400 to 500 m; 9 – thickness of PFS from 500 to 600 m; 10 – thickness of PFS from 600 to 700 m; 11 – thickness of PFS from 700 to 800 m; 12 – thickness of PFS more than 800 m; 14 – lines of permafrost-geothermal sections

По полученным нами данным мощность ММТ Вилуйской синеклизы изменяется в широких пределах от 45 до 820 м. В её пределах выделяются западная (I), северная (II), центральная и юго-восточная (III) части. В западной части (Ыгыаттинская и Кемпендяйская впадины и разделяющий их Сунтарский свод) мощность многолетнемерзлой толщи имеет выраженную широтную зональность, здесь она возрастает со 170 м в южной ($61^{\circ}10'$ с.ш.) до 700 м в её северной ($63^{\circ}25'$ с.ш.) частях, в последней происходит постепенное увеличение мощности в западном направлении с 640 до 820 м.

Более сложное залегание нижней границы многолетнемерзлой толщи отмечается в центральной и юго-восточной частях синеклизы. Так, в пределах Хапчагайского вала мощность

ММТ изменяется в широких пределах и варьирует от 420 до 630 м. Существенные колебания мощности ММТ выявлены и на отдельных геологоразведочных площадях и месторождениях (рис. 5).

Анализ зависимости мощности многолетнемерзлой толщи от параметров и залегания продуктивных горизонтов показал отсутствие прямой связи этих параметров вследствие глубокого (более 2 км) залегания этих горизонтов (рис. 6) [12]. Однако влияния экзотермических реакций в залежах углеводородов на нижнюю границу ММТ полностью исключать не следует. Выявленные колебания мощности мерзлых толщ в пределах отдельных месторождений и локальных структур объясняются общим перераспределением (фокусированием) внутриземного

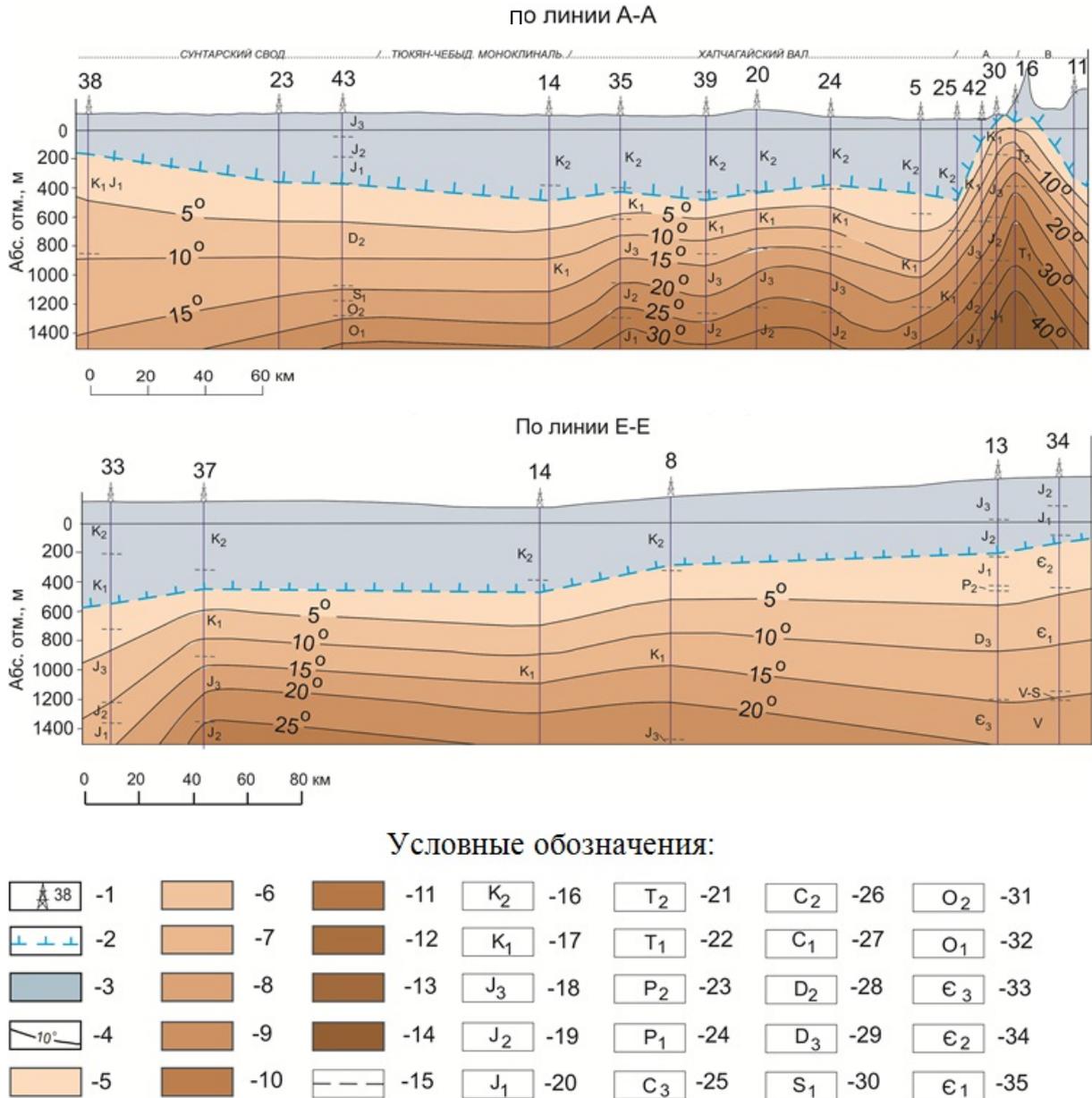


Рис. 4. Мерзлотно-геотермические разрезы в пределах Вилуйской синеклизы: 1 – скважина и номер геологоразведочной площади; 2 – нижняя граница ММТ; 3 – область развития ММП; 4 – изотерма, ее значение; 5–14 – горные породы с температурой: 5 – 0–5 °С, 6 – 5–10 °С, 7 – 10–15 °С, 8 – 15–20 °С, 9 – 20–25 °С, 10 – 25–30 °С, 11 – 30–35 °С, 12 – 35–40 °С, 13 – 40–45 °С, 14 – от 45 °С; 15 – геологическая граница стратиграфических комплексов; 16–35 – отложения: 16 – верхнего мела, 17 – нижнего мела, 18 – верхней юры, 19 – средней юры, 20 – нижней юры, 21 – верхнего триаса, 22 – нижнего триаса, 23 – верхней перми, 24 – нижней перми, 25 – верхнего карбона, 26 – среднего карбона, 27 – нижнего карбона, 28 – верхнего девона, 29 – нижнего девона, 30 – нижнего силура, 31 – верхнего ордовика, 32 – нижнего ордовика, 33 – верхнего кембрия, 34 – среднего кембрия, 35 – нижнего кембрия

Fig. 4. Permafrost-geothermal sections within Vilyui syncline: 1 – well and number of geological exploration area; 2 – bottom boundary of PFS; 3 – area of development of PFS; 4 – isotherm, its value; 5–14 – rocks with temperature: 5 – 0–5 °C, 6 – 5–10 °C, 7 – 10–15 °C, 8 – 15–20 °C, 9 – 20–25 °C, 10 – 25–30 °C, 11 – 30–35 °C, 12 – 35–40 °C, 13 – 40–45 °C, 14 – 45 °C; 15 – geological boundary of stratigraphic complexes; 16–35 – deposits: 16 – cretaceous upper, 17 – cretaceous lower, 18 – upper jurassic, 19 – middle jurassic, 20 – lower jurassic, 21 – upper triassic, 22 – lower triassic, 23 – upper permian, 24 – lower permian, 25 – upper carboniferous, 26 – middle carboniferous, 27 – lower carboniferous, 28 – upper devonian, 29 – lower devonian, 30 – lower silurian, 31 – upper ordovician, 32 – lower ordovician, 33 – upper cambrian, 34 – middle cambrian, 35 – lower cambrian

ОСОБЕННОСТИ ГЕОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ЗАЛЕГАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ

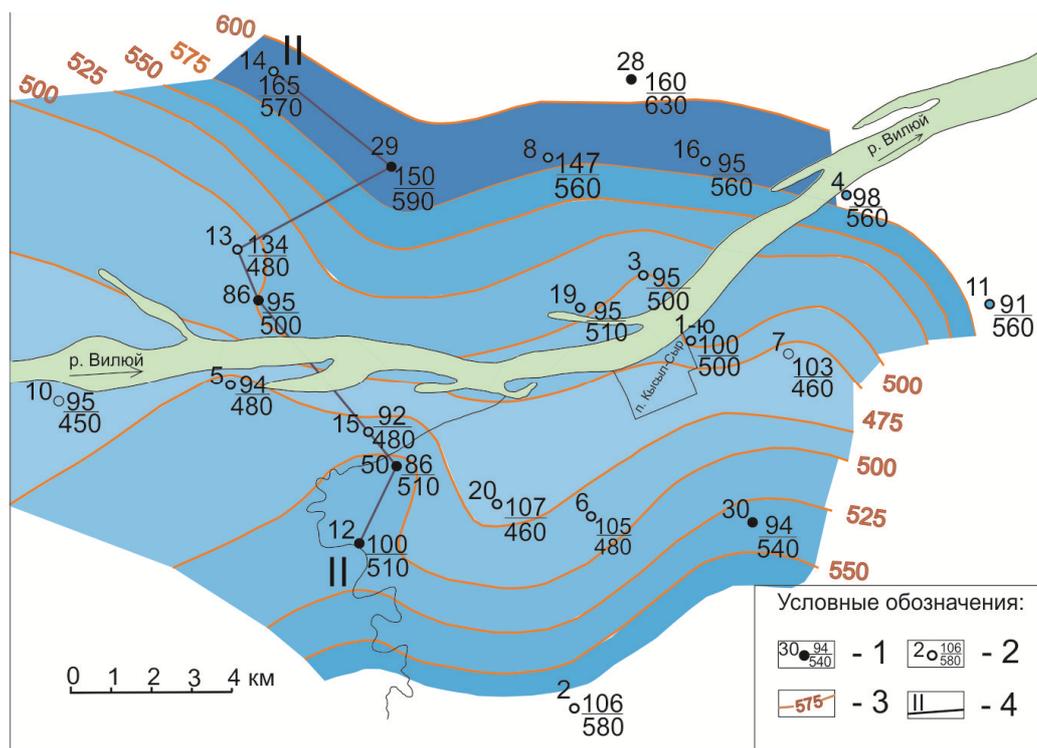


Рис. 5. Карта залегания нижней границы многолетнемерзлой толщи Средне-Вилуйской площади:

1 – скважина и ее номер, в числителе – абсолютная отметка, в знаменателе – мощность ММТ по данным термометрии; 2 – скважина и ее номер, в числителе – абсолютная отметка, в знаменателе – мощность ММТ по данным геофизического каротажа; 3 – изогипсы мощности ММТ; 4 – линия мерзлотно-геотермического разреза

Fig. 5. Map of occurrence of permafrost base of Middle Vilyui area:

1 – well and its number, absolute mark is in numerator, thickness of PFS according to thermometry data is in denominator; 2 – well and its number, absolute mark is in numerator, thickness of PFS according to geophysical logging data is in denominator; 3 – level lines of thickness of PFS; 4 – line of permafrost-geothermal section

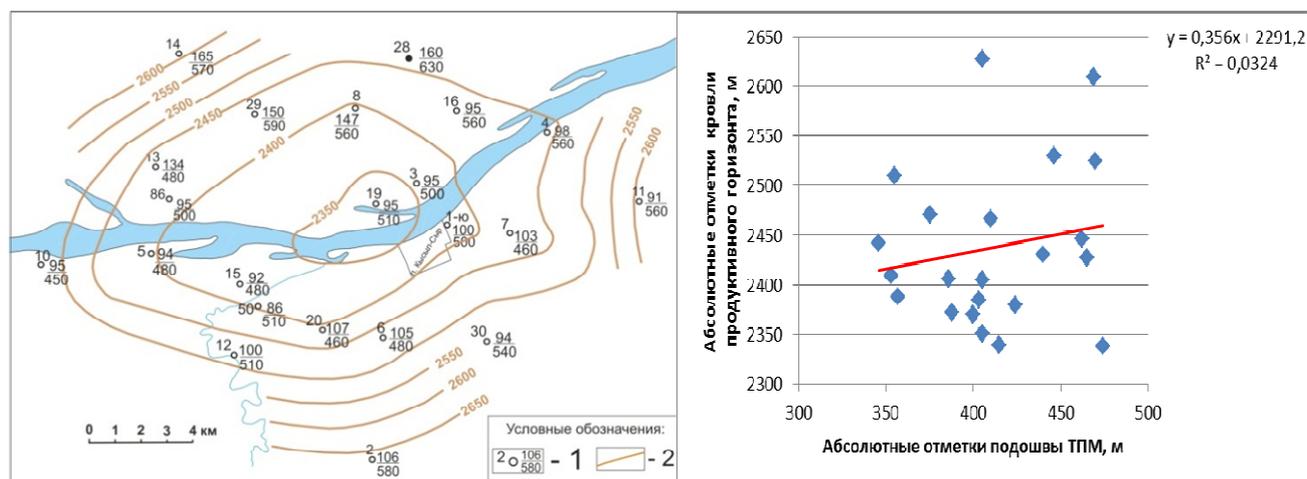


Рис. 6. Карта-схема мощности продуктивного горизонта Т1-III и совокупность точек эффективной мощности продуктивного горизонта и абсолютной отметки подошвы мощности ММТ:

1 – скважина, ее номер, в числителе – абсолютная отметка, в знаменателе – мощность ММТ; 2 – изогипсы мощности продуктивного горизонта

Fig. 6. Schematic map of thickness of productive horizon T1-III and set of points of effective thickness of productive horizon and absolute mark of bottom of thickness of PFS:

1 – well, its number, absolute mark is in numerator, thickness of PFS is in denominator; 2 – level lines of thickness of productive horizon

теплового потока локальными антиклинальными структурами (поднятиями).

Такое фокусирование теплового потока происходит в сложной термодинамической среде, обусловленной относительно невысокими значениями теплопроводности осадочных горных пород и высокой степенью их вариации, наличием локальных дизъюнктивных тектонических нарушений и подмерзлотных вод, вовлеченных в фазовую составляющую, на нижней границе залегания многолетнемерзлых толщ. Такая зависимость выделяется на всех поднятиях Хапчагайского вала, а также в пределах Малыкай-Логлорского вала, где мощность многолетнемерзлой толщи изменяется от 720 м в его осевой части до 520 м в центральной.

Более выдержанными структурами по мощности многолетнемерзлой толщи Вилюйской синеклизы характеризуются её моноклинали и отрицательные структуры более низкого порядка. Так, в пределах Хоргочумской моноклинали (северный борт синеклизы) мощность многолетнемерзлой толщи изменяется от 640 до 820 м. Здесь криогенная толща имеет широтную зональность, постепенно и равномерно увеличиваясь с восточной границы структуры до западной, где в области сочленения с южным крылом Анабарской антеклизы она достигает максимальных своих значений в пределах исследуемой территории.

В пределах Бескюельской моноклинали (южный борт синеклизы, см. рис. 1 и 3) мощность многолетнемерзлой толщи изменяется от 380 до 480 м. Здесь отмечается тенденция увеличения мощности многолетнемерзлой толщи в северо-восточном направлении. Подобная тенденция увеличения мощности ММТ от 460 до 600 м наблюдается в пределах Тюкян-Чебыдинской моноклинали, разделяющей западную и восточную части синеклизы. Линденская впадина характеризуется мощной толщей многолетнемерзлых пород, где она изменяется от 680 до 700 м, нарастая в северном направлении.

Минимальные значения мощности многолетнемерзлой толщи отмечаются в центрально-восточной части синеклизы в Китчанской зоне надвиговых дислокаций, где она изменяется от 45 до 140 м. Это обусловлено высокими значениями здесь внутриземного теплового потока и гидрогеологическими условиями на поверхности.

Заключение

В результате выполненных исследований выявлены особенности температурного режима нестационарных мерзлых толщ региона, в кото-

рых по геотемпературным кривым выделяются четыре интервала, отличающиеся величиной и знаком геотермического градиента. В центральной и северо-западных частях Вилюйской синеклизы, где мощность ММТ достигает 600 м и более, на подошве многолетнемерзлой толщи отмечается безградиентная зона (фазовых переходов) с температурой от $-0,2$ до $-0,4$ °С и мощностью от 20 до 40 м.

На основании имеющихся и вновь полученных материалов о геотемпературном поле криолитозоны проведен анализ и дана оценка мощности многолетнемерзлой толщи отдельных месторождений, структур и Вилюйской синеклизы в целом, где она изменяется в широких пределах (от 45 до 820 м) и имеет тенденцию к сокращению в восточном направлении. Это связано с повышением в этом направлении внутриземного теплового потока и особенностями палеогеоморфологических условий территории. Даже в относительно небольших положительных структурах отмечается значительная амплитуда изменения мощности ММТ, которая достигает 200 м.

Литература

1. Коржуев С.С. Геоморфология долины средней Лены и прилегающих районов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 320 с.
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Л., 1989. Серия 3, вып. 24, кн. 1.
3. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. Изд. 2, перераб. и доп. Якутск: Кн. изд-во, 1973. 120 с.
4. Геология СССР. Т. XVIII, западная часть Якутской АССР. Ч. 1. Геологическое описание. Кн. 2 / Коллектив авторов. М.: Недра, 1970. 256 с.
5. Балобаев В.Т., Володько Б.В., Девяткин В.Н. и др. Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геокриологических измерений. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1985. 48 с.
6. Володько Б.В. О возможности определения по данным метода произвольной поляризации мощности мерзлых пород терригенных толщ // Материалы III Международной конференции по мерзлотоведению. Новосибирск, 1979. С. 264–267.
7. Железняк М.Н. Некоторые аспекты проведения геокриологических исследований при разработке рационального варианта размещения инженерных сооружений и освоении месторождений полезных ископаемых // Крайний Север: проблемы экологии. М.: Ресурс-Инфо, 1999. С. 57–59.
8. Якупов В.С. Исследование мерзлых толщ методами геофизики. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. 336 с.

9. Калинин В.М., Якупов В.С. Региональные закономерности поведения мощности мерзлых толщ. Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1989. 144 с.

10. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР масштаба 1:2 500 000 / Под ред. П.И. Мельникова. М.: ГУГК, 1991. 2 л.

11. Васильев И.С. Пространственно-временные закономерности формирования деятельного слоя в ландшафтах Западной Якутии. Новосибирск: Наука, 2005. 228 с.

12. Семенов В.П., Железняк М.Н. Криолитозона углеводородных месторождений Лено-Вилуйской нефтегазоносной области // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды Международной конференции / Под ред. В.П. Мельникова и Д.С. Дроздова. Тюмень: Эпоха, 2015. С. 349–353.

13. Семёнов В.П., Железняк М.Н. Геотермические условия Вилуйской синеклизы // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII, № 4. С. 3–10.

14. Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 193 с.

15. Железняк М.Н., Семёнов В.П., Балобаев В.Т., Русаков В.Г. Мерзлотно-геотермические условия Вилуйской синеклизы // Материалы 4-й конференции геокриологов России, МГУ, 7–9 июня 2011 г. М.: Университетская книга, 2011. С. 59–65.

16. Семенов В.П. Геотемпературное поле и криолитозона Вилуйской синеклизы: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 22 с.

References

1. Korzhuev S.S. Geomorfologiya doliny srednej Leny i privileyuschiikh rajonov. M.: Izd-vo AN SSSR, 1959. 320 s.

2. Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR. L., 1989. Seriya 3, vyp. 24., kn. 1.

3. Gavrilova M.K. Klimat tsentral'noj Yakutii. Izd. 2 – pererab. i dop. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1973. 120 s.

4. Geologiya SSSR. Tom XVIII, zapadnaya chast' Yakutskoj ASSR. Chast' 1. Geologicheskoe opisanie. Kniga 2 / Kollektiv avtorov. M.: Nedra, 1970. 256 s.

5. Balobaev V.T., Volod'ko B.V., Devyatkin V.N. i dr. Rukovodstvo po primeneniyu poluprovodniko-

vykh termorezistorov dlya geokriologicheskikh izmerenij. Yakutsk: IMZ SO AN SSSR, 1985. 48 s.

6. Volod'ko B.V. O vozmozhnosti opredeleniya po dannym metoda proizvol'noj polyarizatsii moschnosti merzlykh porod terrigennykh tolsch // Materialy III Mezhdunarodnoj konferentsii po merzlotovedeniyu. Novosibirsk, 1979. S. 264–267.

7. Zheleznyak M.N. Nekotorye aspekty provedeniya geokriologicheskikh issledovanij pri vyrabotke ratsional'nogo varianta razmescheniya inzhenernykh sooruzhenij i osvoenii mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh // Krajnij Sever: problemy ekologii. M.: Resurs-Info, 1999. S. 57–59.

8. Yakupov V.S. Issledovanie merzlykh tolsch metodami geofiziki. Yakutsk: YaF Izd-va SO RAN, 2000. 336 s.

9. Kalinin V.M., Yakupov V.S. Regional'nye zakonomernosti povedeniya moschnosti merzlykh tolsch. Yakutsk: YaNTs SO AN SSSR, 1989. 144 s.

10. Merzlotno-landshaftnaya karta Yakutskoj ASSR masshtaba 1 : 2 500 000 / Pod red. P.I. Mel'nikova. M.: GUGK, 1991. 2 s.

11. Vasil'ev I.S. Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti formirovaniya deyatel'nogo sloya v landshaftakh Zapadnoj Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 2005. 228 s.

12. Semenov V.P., Zheleznyak M.N. Kriolitozona uglevodorodnykh mestorozhdenij Leno-Vilyujskoj neftegazonosnoj oblasti // Arktika, Subarktika: moza-ichnost', kontrastnost', variativnost' kriosfery: Trudy Mezhdunarodnoj konferentsii / Pod red. V.P. Mel'nikova i D.S. Drozdova. Tyumen': Epokha, 2015. S. 349–353.

13. Semenov V.P., Zheleznyak M.N. Geotermicheskie usloviya Vilyujskoj sineklizy // Kriosfera Zemli. 2013. T. XVII, № 4. S. 3–10.

14. Balobaev V.T. Geotermiya merzloy zony litosfery severa Azii. Novosibirsk: Nauka, 1991. 193 s.

15. Zheleznyak M.N., Semenov V.P., Balobaev V.T., Rusakov V.G. Merzlotno-geotermicheskie usloviya Vilyujskoj sineklizy // Materialy chetvertoj konferentsii geokriologov Rossii, MGU im. Lomo-nosova, 7–9 iyunya 2011 g. M.: Universitetskaya kniga, 2011. S. 59–65.

16. Semenov V.P. Geotemperaturnoe pole i kriolitozona Vilyujskoj sineklizy: Avtoref. diss. ... kand. geol.-min. nauk. Yakutsk: IMZ SO RAN, 2018. 22 s.

Поступила в редакцию 02.10.2018

Об авторах

СЕМЕНОВ Валерий Петрович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, semenov.vp@rambler.ru;

ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, директор, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, fe@mpi.ysn.ru.

About the authors

SEMENOV Valeriy Petrovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya St., Yakutsk, 677010, Russia, semenov.vp@rambler.ru;

ZHELEZNYAK Mikhail Nikolaevich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Principal Researcher, Director, P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya St., Yakutsk, 677010, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, fe@mpi.ysn.ru.