

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 550.361

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

В.П. Семенов, М.Н. Железняк

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; semenov.vp@rambler.ru*

Дана характеристика геотермических условий одной из областей развития нестационарных мерзлых толщ Сибирской платформы – Вилюйской синеклизы. Получены и приведены новые данные о мощности толщ многолетнемерзлых пород и геотемпературном поле отдельных структур Вилюйской синеклизы. Выполнены определения и дана оценка величины внутриземного теплового потока в мерзлой толще и подмерзлотном горизонте. Установлено, что тепловой поток в мерзлой толще на 30–34 мВт/м² меньше величины теплового потока в подмерзлотном горизонте. В характере геотемпературных кривых выделено четыре интервала, отличающихся величиной геотермического градиента и отражающих различные палеоприродно-климатические условия при формировании мерзлой толщи региона. По данным исследований построен геотермический разрез до глубины 2000 м, характеризующий особенности геотемпературного поля региона.

Температура горных пород, геотермический градиент, мощность толщи мерзлых пород, внутриземной тепловой поток, деградация мерзлой толщи, геотермический разрез, Вилюйская синеклиза

GEOTHERMAL CONDITIONS IN THE VILYUI BASIN

V.P. Semenov, M.N. Zhelezniak

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
677010, Yakutsk, Merzlotnaya st., 36, Russia; semenov.vp@rambler.ru*

The characteristics of the geothermal conditions in the Vilyui basin have been adduced. The Vilyui basin is located within the Siberian Platform and contains disequilibrium permafrost. Recently obtained data on permafrost thickness and temperature distribution for geological units of the Vilyui basin have been presented. Estimates of geothermal heat fluxes in and below the permafrost are given. It has been determined that the heat flux in the permafrost is 30–34 mW/m² lower than in the subpermafrost zone. Four intervals are identified on the temperature curves differing in geothermal gradient and indicating different paleoclimatic conditions in the course of permafrost development. Based on the obtained data, a 2,000 m depth geothermal profile characterizing the geothermal field in the region has been plotted.

Ground temperature, geothermal gradient, permafrost thickness, geothermal heat flux, permafrost degradation, geothermal profile, Vilyui basin

ВВЕДЕНИЕ

Вилюйская синеклиза по высокой концентрации углеводородных природных ресурсов и других полезных ископаемых, их экономической значимости принадлежит к числу важнейших регионов России.

Геокриологические исследования в регионе были начаты в 1957 г. комплексными экспедициями Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР и его Северо-Восточным отделением в долине р. Вилюй (А.И. Ефимов, Н.С. Данилова, Е.Г. Катасонова и др.), в Центральной Якутии (Н.П. Анисимова, П.А. Соловьев и др.). Позже сотрудниками кафедры геокриологии МГУ была

проведена мерзлотно-геологическая съемка в западной части Вилюйской синеклизы в верховье р. Вилюй и в районе г. Мирного (В.А. Кудрявцев, Н.Н. Романовский, К.А. Кондратьева и др.).

В 1965–1980 гг. геотермические исследования на разведочных нефтегазовых площадях в глубоких скважинах проводились сотрудниками лаборатории геотермии Института мерзлотоведения СО АН СССР В.Т. Балобаевым, В.Н. Девяткиным, А.И. Левченко, Б.В. Володько, В.Г. Русаковым [Балобаев, 1983]. Пластовые температуры продуктивных горизонтов на разведочных нефтегазовых площадях были получены геологами ВНИГРИ,

Таблица 1. Температура пород Вилюйской синеклизы и Предверхоанского прогиба на глубинах 1000–3000 м [Мельников и др., 1972]

Пункт измерения	Температура на разной глубине (м), °С				
	1000	1500	2000	2500	3000
Олекминск	4,8	8,0	13,8	16,1	22,0
Пос. Амга	12,5	20,7	29,0	33,2	45,4
Пос. Намцы	14,3	26,9	46,0	53,2	78,0
Вилюйск	9,6	22,6	35,6	42,1	61,6
Пос. Берге, скв. Р-1	26,1	36,6	47,5	52,9	69,4
Усть-Вилюй, скв. Р-5	28,2	42,0	57,7	61,5	81,0
Пос. Сабо-Хая, скв. Р-1	27,6	41,0	60,3	66,9	92,4
Пос. Бахынай, скв. Р-1	10,4	21,7	36,5	42,3	59,6

Таблица 2. Геотермические параметры мерзлой толщи и величина внутреннего теплового потока в пределах Вилюйской синеклизы

Площадь измерения температуры пород	Глубина залегания нулевой изотермы, м	Температура пород на подошве слоя годовых теплооборотов, °С	Тепловой поток q_T , мВт/м ²	
			в подмерзлотной толще	в толще мерзлых пород
Бахынайская	650	–5,0	55	20
Балагачинская	700	–5,0	52	15
Средне-Вилюйская	500–630	–1,8	50	6
Усть-Вилюйская	150	–2,8	60	36
Бадаранская	500	–2,0	43	11
Сабо-Хая	50–80	–1,7	58	32
Линденская	400	–2,1	50	14
Вилюйская	600	–3,0	42	13
Хайлахская	600	–5,0	44	18
Олойская	460	–3,2	54	15
Уордахская	400	–4,0	42	24

ЯТГУ, СЯНРЭ, треста ЯНГР в начале 1970-х гг. при разведочном бурении. Работами С.М. Фотиева [1974], К.А. Кондратьевой с соавт. [1989] установлено, что в разных районах рассматриваемой структуры на глубине годовых теплооборотов температура пород изменяется в широких пределах. Прослеживается ее закономерное понижение с юга (–1,5 °С в пос. Бердигестях) на север (–3,0 °С на Бахынайской площади).

По геотермическим наблюдениям, в пределах Вилюйской синеклизы при идентичности теплового потока в недрах, составляющего 46–55 мВт/м², отмечены существенные различия температур пород в подмерзлотных горизонтах на

одной и той же глубине (табл. 1–3), что связано с условиями теплообмена в толщах слагающих структуру пород [Балобаев, 1991].

Согласно мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР [1991], большая часть Вилюйской синеклизы расположена в Вилюйской аласной провинции со сплошным распространением многолетнемерзлых пород. Преобладающие типы местности данной провинции: межаласный, аласный, склоновый и межгрядово-низинный средневысотных террас [Мерзлотно-ландшафтная карта..., 1991].

Месторождения полезных ископаемых сосредоточены как в толще мерзлых пород (ТМП), так и ниже ее. В результате этого изучение особенностей распространения ТМП и ее параметров становится необходимым.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ

Вилюйская синеклиза расположена в восточной части Сибирской платформы, северная и южная границы ее условно определяются по выходам палеозойских пород. На востоке она граничит с Верхоянской орогенной областью, на западе – с Непско-Ботуобинской антеклизой (рис. 1).

Таблица 3. Температура пород в некоторых структурах Сибирской платформы [Балобаев, 1991]

Глубина, м	Температура пород, °С	
	Вилюйская синеклиза	Предверхоанский прогиб
500	0–1	–0,5...+2,0
1000	6–20	11–15
2000	30–45	37–53
3000	50–75	60–68

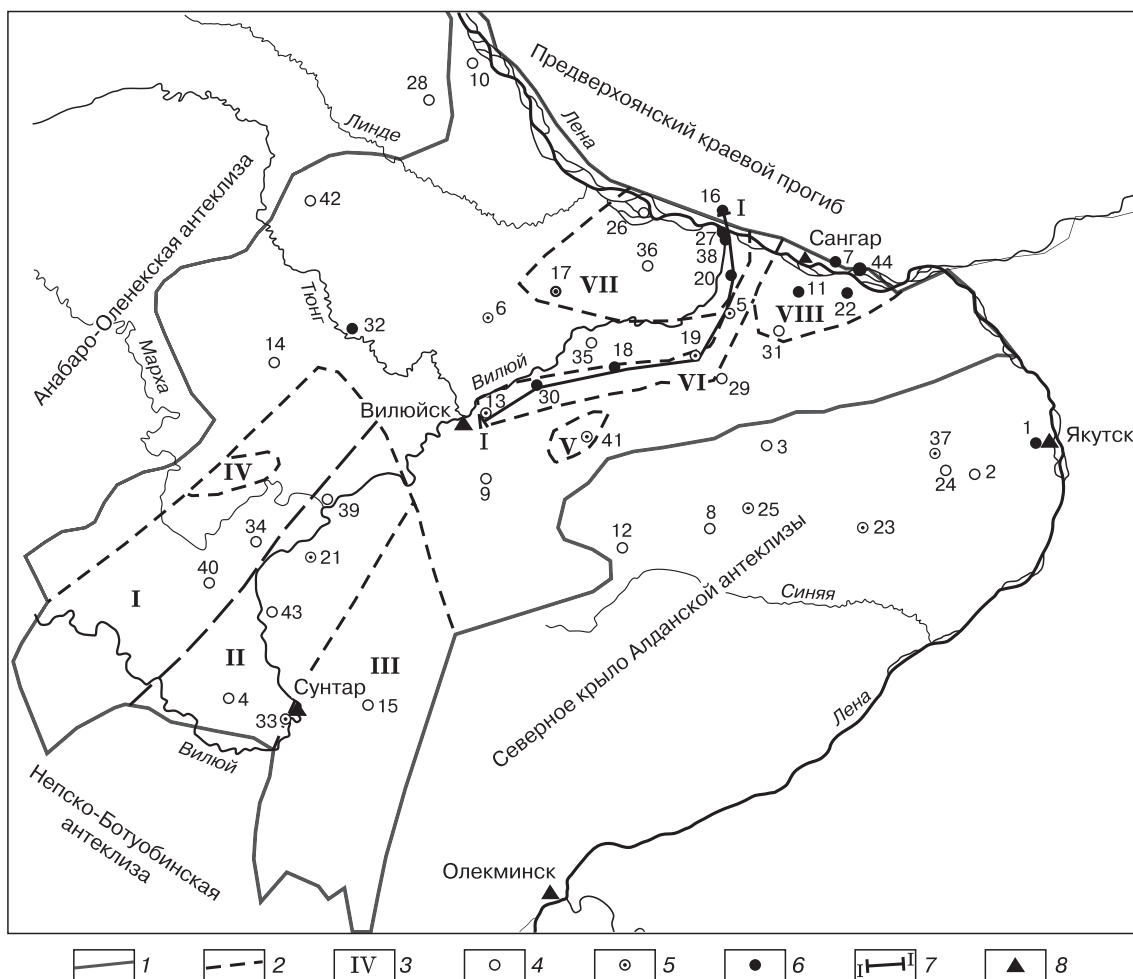


Рис. 1. Схема тектонического районирования и расположения разведочных площадей Вилуйской синеклизы.

1 – граница Вилуйской синеклизы; 2 – границы тектонических структур второго порядка; 3 – номер и название структуры; 4–6 – геолого-разведочные площади, на которых получена информация о мощности ТМП: 4 – по косвенным данным, 5, 6 – по геотермии и стандартному каротажу (5 – 1970–1980 гг., 6 – 2009–2011 гг.); 7 – геотермический профиль; 8 – населенный пункт.

Структуры: I – Ыгыаттинская впадина, II – Сунтарский свод, III – Кемпендяйская впадина, IV – Мархинская впадина, V – Тангнарынская впадина, VI – Хапчагайский вал, VII – Линденская впадина, VIII – Лунгхинско-Калинский прогиб.

Геолого-разведочные площади: 1 – Вилуйский тракт (23 км), 2 – Вилуйский тракт (40 км), 3 – Андреевская, 4 – Аранастахская, 5 – Бадаранская, 6 – Балагачинская, 7 – Балымахская, 8 – Бапчагайская, 9 – Барыканская, 10 – Бахымайская, 11 – Бергеинская, 12 – Верхнесинская, 13 – Вилуйская, 14 – Западно-Тюнгская, 15 – Кемпендяйская, 16 – Китчанская, 17 – Линденская, 18 – Мастахская, 19 – Неджелинская, 20 – Нижне-Вилуйская, 21 – Нюрбинская, 22 – Олойская, 23 – Бердигестях, 24 – Магарас, 25 – Орго-Сурт, 26 – Прибрежная, 27 – Сабо-Хаинская, 28 – Северо-Линденская, 29 – Соболюхская, 30 – Средне-Вилуйская, 31 – Средне-Лунгхинская, 32 – Средне-Тюнгская, 33 – Сунтарская, 34 – Сыгдахская, 35 – Толонская, 36 – Уорангская, 37 – Уордахская, 38 – Усть-Вилуйская, 39 – Усть-Мархинская, 40 – Усть-Меикская, 41 – Хайлахская, 42 – Хоргочумская, 43 – Шелонская, 44 – Эксеняхская.

Вилуйская синеклиза представляет собой обширную (около 500 км в поперечнике) зону погружения, разделяющую Алданскую и Анабарскую антеклизы. Верхние горизонты синеклизы сложены преимущественно континентальными отложениями юры и мела, под которыми бурением установлены сходные с ними по составу отложения триаса и верхнего палеозоя, а также карбонатно-

терригенные с эвапоритами и базальтами образования девона и низов карбона. Расположенные вдоль склонов вышеуказанных антеклиз нижнепалеозойские и вендские отложения погружаются под мезозойские и верхне- и среднепалеозойские толщи синеклизы. Такие разрезы вскрыты отдельными глубокими скважинами в ее пределах. По геофизическим данным, в наиболее глубоких



Рис. 2. Термокарстовое озеро. Бергеинская площадь.



Рис. 3. Алас. Олойская площадь.

авлакогенах предполагается присутствие рифейских отложений. Фундамент синеклизы имеет блоковое строение и вследствие этого структуры чехла тоже неоднородны по своему строению. В них выделяют ряд структур: Хапчагайское, Сунтарское, Верхнесинское поднятия, Линденская, Лунгхингская, Кемпендяйская, Мархинская, Ыгыаттинская впадины и др. [Тектоника..., 2001].

В геоморфологическом отношении площадь Вилюйской синеклизы в основном относится к Центрально-Якутской низменности, подразделяющейся на два уровня: древнюю возвышенную позднеэоценовую поверхность и молодую пониженную поверхность террас рек Лена, Вилюй и их притоков. Абсолютные высоты нижней поверхности изменяются от 60 до 200 м, верхней – от 300 до 500 м [Коржуев, 1965]. Для рельефа территории типичны термокарстовые морфоскульптуры (формы), представленные в виде полигональных образований, бугров пучения, гидролакколитов и многочисленных термокарстовых озер и аласов. Эрозионное расчленение выражено слабо, господствуют процессы аккумуляции (рис. 2, 3).

Климат района резко континентальный, проявляющийся в больших перепадах температур воздуха и довольно малом (200–210 мм) количестве атмосферных осадков. Характерными особенностями климатических условий являются большая продолжительность зимнего периода (семь месяцев: октябрь–апрель), преобладающее направление ветра в течение года западное (32 %) и северо-восточное (20 %) со скоростью от 0,5 до 5,0 м/с (число безветренных дней – 35). Общий антициклональный режим атмосферной циркуляции при значительной континентальности климата способствует развитию температурной инверсии и формированию низких среднегодовых температур воздуха на всей территории.

Среднегодовая температура воздуха колеблется от $-7,8^{\circ}\text{C}$ (Сунтар) до $-11,1^{\circ}\text{C}$ (Хатырык-Хомо). Годовое количество осадков изменяется от 257 мм (Хатырык-Хомо) до 354 мм (Сабо-Хая) [Научно-прикладной справочник..., 1989]. Низкая среднегодовая температура в сочетании с отрицательным радиационным балансом обуславливают промерзание верхних горизонтов литосферы и формирование многолетнемерзлых пород.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной метод исследований – геотермический. Температурные измерения в скважинах проводились точечным методом на установках, изготовленных на базе полупроводниковых терморезисторов. В качестве регистрирующей аппаратуры для измерения сопротивлений терморезисторов использовались 4,5–5-разрядные мультиметры фирмы “АРРА2”. Подробное описание, конструкция и вольт-амперные характеристики терморезисторов и регистрирующей аппаратуры, изготовление геотермических установок и методика полевых исследований приведены в работах И.Т. Шефтеля [1973], В.Т. Балобаева [1985]. Температурные измерения проводились до глубины 1200 м поинтервально (через 10–20 м). Глубина измерений определялась техническим состоянием стволов скважин. Время выстойки (между замерами) составляло 20–40 мин в сухом стволе скважины и 10–20 мин в жидкой среде. Для контроля периодически проводились дублирование замеров и выборочный контроль при подъеме датчика.

Для определения мощности ТМП за опорные принимались результаты температурных замеров в стволе выстоявшихся после бурения скважин, а при их отсутствии – данные термокаротажа. Вре-

мя выстойки скважин после окончания бурения при геотермических исследованиях (2009–2011 гг.) составляло 15–30 лет.

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2009–2011 гг. в рамках программы “Исследование закономерностей формирования геотемпературного поля и криолитозоны Сибирской платформы” сотрудниками лаборатории геотермии Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН были выполнены геотермические исследования в этом регионе на 11 разведочных площадях (пл.) (см. рис. 1). Было подтверждено, что тепловое поле многолетнемерзлой толщи в пределах Вилюйской синеклизы характеризуется нестационарным режимом [Балобаев, 1991; Железняк и др., 2011]. Установлено, что температура горных пород на подошве слоя годовых теплооборотов в большинстве случаев изменяется от $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (пл. Средне-Вилюйская) до $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (пл. Сабо-Хаинская), на

глубине 500 м ее значения варьируют от $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (пл. Средне-Тюнгская) до $+13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (пл. Сабо-Хаинская), на глубине 1000 м – от $+11,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (пл. Средне-Вилюйская) до $+17,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (пл. Мастахская).

Мощность ТМП в пределах Вилюйской синеклизы изменяется от 50 м (пл. Сабо-Хаинская) до 680 м (пл. Средне-Тюнгская) (рис. 4). Отмечается ее повышение в северном и западном направлениях. Кроме того, значительные изменения мощности толщи мерзлых пород выявлены в пределах Средне-Вилюйской и Средне-Тюнгской разведочных площадей, где она варьирует от 500 до 630 м и от 580 до 680 м соответственно.

В характере температурных кривых выделяется четыре интервала:

1 – интервал с отрицательным градиентом, мощность которого изменяется от 30 м (пл. Усть-Вилюйская) до 210 м (пл. Средне-Вилюйская), величина геотермического градиента (g) здесь варьирует от $-0,58\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (пл. Средне-Тюнгская) до $-3,2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (пл. Средне-Вилюйская);

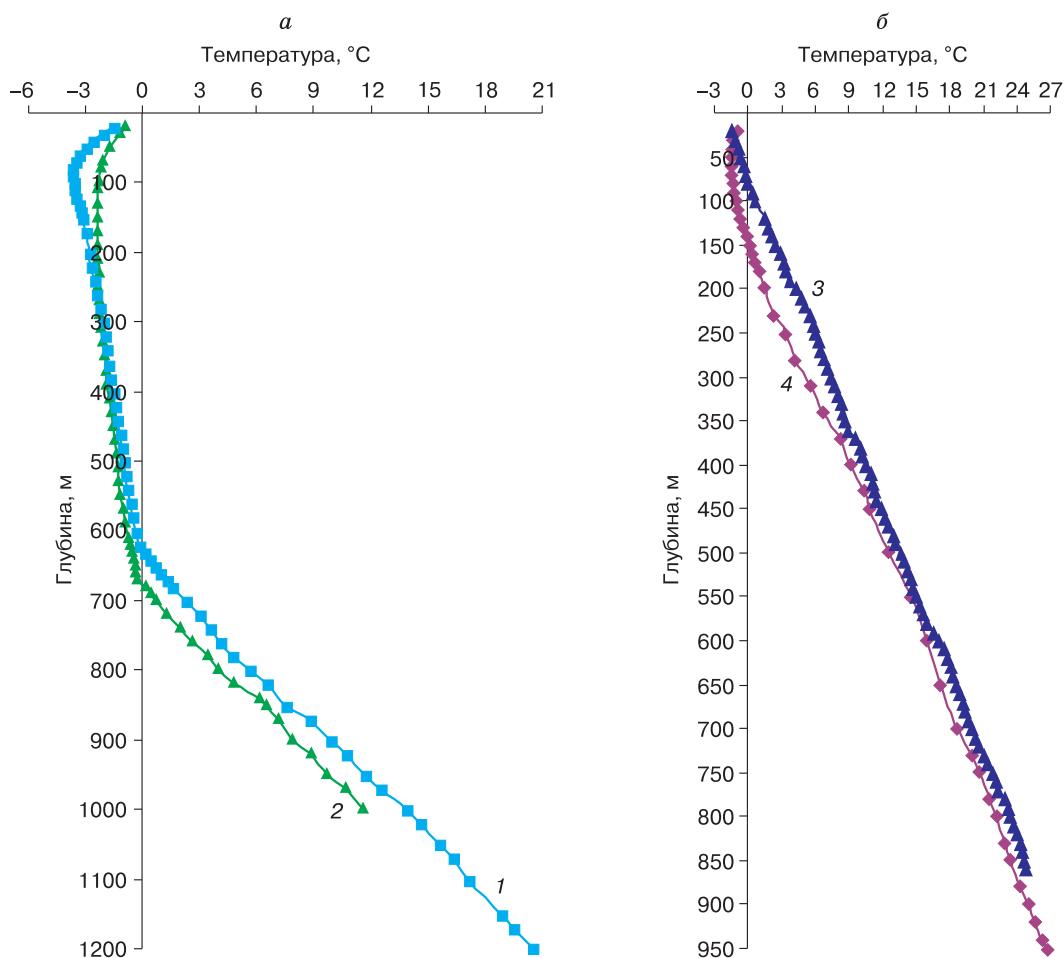


Рис. 4. Изменение температуры пород с глубиной.

а: 1 – скв. 28, пл. Средне-Вилюйская; 2 – пл. Средне-Тюнгская; б: 3 – скв. 2, пл. Сабо-Хаинская; 4 – скв. 5, пл. Усть-Вилюйская.

2 – безградиентный или слабоградиентный интервал с g до $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ и мощностью горизонта от 20 м (пл. Усть-Вилуйская, Средне-Вилуйская) до 160 м (пл. Средне-Тюнгская);

3 – интервал с положительным градиентом в толще мерзлых пород от $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (пл. Средне-Вилуйская) до $2,04\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (пл. Усть-Вилуйская), мощностью от 80 м (пл. Усть-Вилуйская) до 480 м (пл. Средне-Вилуйская);

4 – интервал с положительным градиентом в подмерзлотной толще, значения которого варьируют от $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (пл. Усть-Вилуйская) до $3,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (пл. Средне-Тюнгская) (см. рис. 4).

Современное термическое состояние верхней части литосферы определяется в основном различием современной температуры и температуры последней холодной эпохи (сартанской). Нестационарная мерзлая толща, развитая на большей части территории Вилуйской синеклизы (см. рис. 4, а), характеризуется различием значений тепловых потоков на нижней фазовой границе. Так как современная эпоха теплее предыдущей, то поток тепла в талых породах больше, чем в мерзлых, вследствие поглощения части внутриземного теплового потока на фазовой границе в процессе таяния включений льда. В результате нижняя фазовая граница мерзлых пород медленно поднимается, а их мощность сокращается.

Геотермическими исследованиями установлено, что в центральной и северо-западной частях синеклизы, где мощность ТМП достигает 400 м и более, на ее подошве отмечается безградиентный интервал (зона фазовых переходов, мощность которой достигает 50 м). В восточной же части, где мощность ТМП составляет менее 150 м, таких областей не установлено. Это связано с поднятием нижней границы ТМП в породах с высокой льдистостью, где происходят фазовые переходы (лед–вода).

На определенном этапе потепления климата тепловое состояние интервала мерзлых пород начинает характеризоваться нулевой температурой. В Западной Сибири температурные кривые в мерзлой (200–400 м) толще имеют безградиентный или слабоградиентный ($0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$) характер с температурой, близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В пределах Вилуйской синеклизы этот интервал фазовых переходов (30–50 м) наблюдается лишь на нижней границе многолетнемерзлой толщи.

Стационарные мерзлые толщи небольшой современной мощности сформировались в восточной части Вилуйской синеклизы (пл. Усть-Вилуйская, Сабо-Хаинская и др., см. рис. 4, б), их формирование связано с особенностями геологического строения и палеогляциогенной обстановки территории.

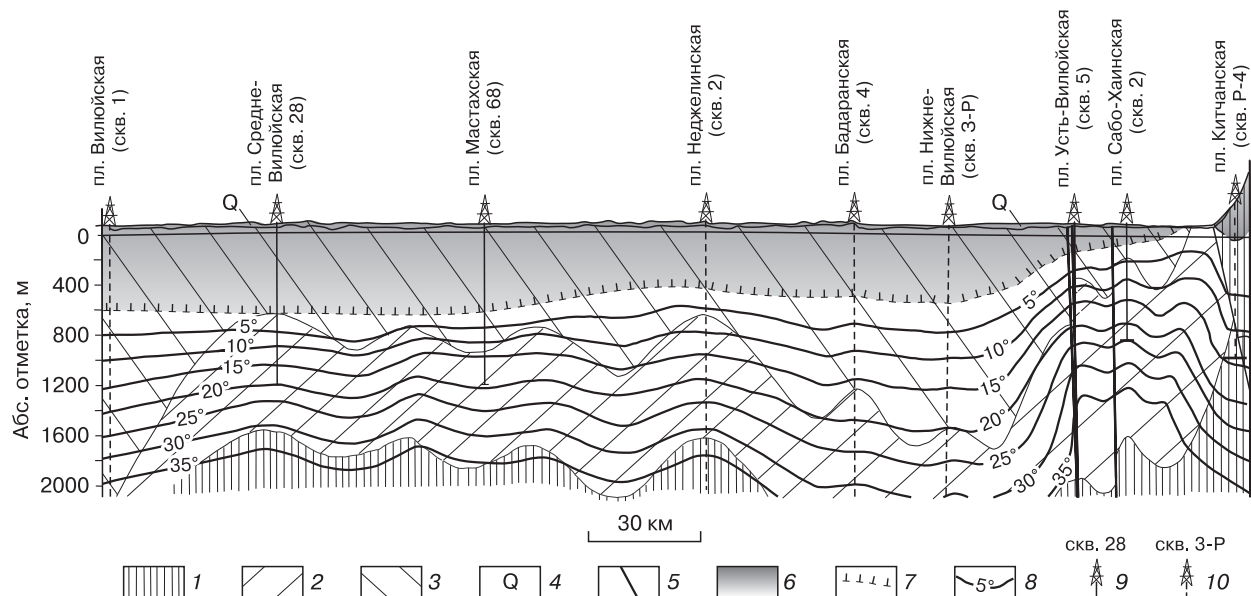


Рис. 5. Геотермический профиль Вилуйской синеклизы (положение профиля в плане см. на рис. 1).

1 – песчаники, алевролиты, аргиллиты, глины (Т); 2 – песчаники, песчаники с чередованием аргиллитов, алевролитов и глин (J); 3 – песчаники, песчаники с прослоями алевролитов, аргиллитов, бурых, каменных углей и лигнита (К); 4 – песок, супесь, суглинки (Q); 5 – линии тектонических нарушений; 6 – толща мерзлых пород; 7 – подошва ТМП; 8 – изотерма, $^{\circ}\text{C}$; 9, 10 – название площади, скважина и ее номер, глубина выполненных исследований; 9 – точечные геотермические измерения, 10 – стандартный каротаж (в том числе термокартаж).

В Вилюйской синеклизе под влиянием сохранения реликтовой ТМП, существовавшей в Сарганскую эпоху, и возрастания величины внутриземного теплового потока с запада на восток отмечается увеличение мощности многолетнемерзлой толщи в обратном направлении. Так, в западной части величина теплового потока (q_T) составляет 40–45 мВт/м² (пл. Средне-Вилюйская, Матахская, Вилюйская и др.), в восточной части – 50–60 мВт/м² (пл. Китчанская, Сабо-Хаинская, Усть-Вилюйская и др.). Это связано с приближенностью этих участков к тектонически активному Верхоянскому хребту, отличающемуся высоким значением $q_T = 60–80$ мВт/м².

Кроме собственных наблюдений, авторами проработаны фондовые материалы ИМЗ СО РАН и Якутского геологического территориального фонда (ЯГТФ). В результате впервые для региона были собраны и систематизированы геотермические данные по глубоким (более 500 м) скважинам Вилюйской синеклизы (см. рис. 1). Анализ полученных данных позволил оценить геотермические параметры и мощность ТМП для различных районов Вилюйской синеклизы (см. табл. 2). На основе этих данных построен геотермический разрез по линии разведочных площадей с запада на восток (рис. 5), характеризующий геотемпературное поле и положение нижней границы ТМП. Расчетами установлено, что величина внутриземного теплового потока в талой (подмерзлотной) зоне больше, чем в мерзлоте, на 30–34 мВт/м² (см. табл. 2). Используя алгоритм расчета теплового состояния массива горных пород при нестационарном режиме, разработанный В.Т. Балобаевым [Балобаев, 1991; Железняк и др., 2011], дана оценка динамики нижней границы ТМП для разведочных площадей, в которых выполнены геотермические исследования. Получено, что скорость деградации нижней границы ТМП в пределах различных площадей варьирует от 1,7 до 2,5 см/год (см. табл. 2). Это соответствует полученным ранее расчетным данным для семи разведочных площадей Вилюйской синеклизы [Железняк и др., 2011].

ВЫВОДЫ

В процессе настоящих исследований получены следующие результаты.

1. Установлена значительная неоднородность температуры пород, которая в пределах различных площадей изменяется от –1,4 до +13,7 °С (на глубине 500 м) и от +11,6 до +17,6 °С (на глубине 1000 м).

2. Выявлены особенности температурного режима нестационарных толщ Вилюйской синеклизы. В результате анализа геотемпературных кри-

вых (по характеристике их изменения с глубиной) выделено четыре интервала, отличающихся величиной и знаком градиента температуры.

3. Установлено, что мощность ТМП в пределах синеклизы варьирует от 50 до 680 м. Отмечается ее повышение в северном и западном направлениях. Причиной такого широкого диапазона изменения мощности ТМП, наряду с особенностями геотемпературного режима, являются изменения палеоклиматических условий и палеогляциогенной обстановки региона в последние 100 тыс. лет.

Кроме того, значительные изменения мощности ТМП выявлены на Средне-Вилюйской и Средне-Тюнгской площадях, где она варьирует от 500 до 630 м и от 580 до 680 м соответственно, в зависимости от теплофизических свойств горных пород и глубины залегания продуктивных углеводородных горизонтов.

4. Определены величины внутриземного теплового потока для ряда разведочных площадей. Установлено, что его величина в талой (подмерзлотной) зоне больше величины теплового потока в мерзлой толще на 30–34 мВт/м². Это подтверждает оценку, сделанную в 1990-х гг. В.Т. Балобаевым и его коллегами на основании каротажного материала и геотермических измерений в скважинах с неустановившимся тепловым режимом.

5. На основе каротажного материала, геологических разрезов буровых скважин, геотермических исследований, выполненных в разные годы сотрудниками лаборатории геотермии ИМЗ СО РАН, построен геотермический разрез Вилюйской синеклизы до глубины 2000 м по линии разведочных скважин с запада на восток, характеризующий геотемпературное поле и положение нижней границы ТМП.

В настоящее время авторами разработана структура и завершается формирование электронной геокриологической базы данных Вилюйской синеклизы. Формирующаяся база данных открыта для пополнения, и авторы будут рады сотрудничеству в этом направлении с другими учеными, имеющими информацию о геотермических исследованиях и теплофизических свойствах горных пород Вилюйской синеклизы.

Литература

- Балобаев В.Т.** Теплофизические исследования криолитозоны Сибири / В.Т. Балобаев, А.В. Павлов, Г.З. Перльштейн и др. Новосибирск, Наука, 1983, 216 с.
- Балобаев В.Т.** Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геокриологических измерений / В.Т. Балобаев, Б.В. Володько, В.Н. Девяткин и др. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, 48 с.
- Балобаев В.Т.** Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии / В.Т. Балобаев. Новосибирск, Наука, 1991, 193 с.

Железняк М.Н., Семенов В.П., Балобаев В.Т., Русаков В.Г. Мерзлотно-геотермические условия Вилюйской синеклизы // Материалы Четвертой конф. геокриологов России (Москва, 7–9 июня 2011 г.). М., Унив. кн., 2011, с. 59–65.

Кондратьева К.А., Марахтанов В.П., Фотиев С.М. Геокриологические условия Лено-Вилюйского региона // Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М., Недра, 1989, 414 с.

Коржуев С.С. Карст Якутии // Типы карста в СССР. М., Наука, 1965, с. 67–72.

Мельников П.И., Балобаев В.Т., Кутасов И.М., Девяткин В.Н. Геотермические исследования в Центральной Якутии // Геология и геофизика, 1972, № 12, с. 134–137.

Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР. Масштаб 1: 2 500 000 / Ред. П.И. Мельников. М., ГУТК, 1991, 2 л.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3, вып. 24, кн. 1. Л., Гидрометеиздат, 1989, 608 с.

Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М., МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001, 571 с.

Фотиев С.М. Геокриологические условия Средней Сибири / С.М. Фотиев, Н.С. Данилова, Н.С. Шевелева. М., Наука, 1974, 148 с.

Шефтель И.Т. Терморезисторы / И.Т. Шефтель. М., Наука, 1973, 416 с.

*Поступила в редакцию
25 февраля 2013 г.*