

## О СООТНОШЕНИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В МЕРЗЛОЙ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ НЕМЕРЗЛОЙ ТОЛЩАХ ЛИТОСФЕРЫ САХА-ЯКУТИИ

В.Н. Девяткин, В.В. Ан

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, г. Тюмень, а/я 1230, Россия*

Рассмотрены некоторые методические вопросы оценки состояния криолитозоны в пределах различных геоструктур Саха-Якутии на основе геотермических данных. Для Анабарской антеклизы и Верхояно-Колымской складчатой системы характерны соотношения между тепловыми потоками  $q_m:q$  близкими или равными 1, т.е. геотемпературное поле криолитозоны находится в соответствии с климатическими и внутриземными тепловыми условиями, несмотря на то, что тектоническое и энергетическое состояние этих двух геоструктурных блоков весьма различно. Об этом свидетельствует и диапазон величин тепловых потоков в мерзлых и подстилающих немерзлых толщах: в первом из этих блоков величина теплового потока варьирует в пределах 10—30 мВт/м<sup>2</sup>, а во втором — 50—100 мВт/м<sup>2</sup>. В геоструктурных блоках Вилюйской синеклизы и Предверхоанского прогиба соотношение между тепловыми потоками  $q_m:q$  варьирует в пределах от 0 до 1, что свидетельствует о несоответствии геотемпературного поля и мощности криолитозоны современным климатическим и внутриземным тепловым условиям.

*Криолитозона, тепловой поток, температура, геоструктуры, Якутия*

### ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THERMAL FLOWS IN FROZEN AND UNDERLAYING UNFROZEN ROCKS IN THE LITHOSPHERE OF SAKHA-YAKUTIA

V.N. Devyatkin and V.V. An

*Earth Cryosphere Institute SB RAS 625000, Tyumen, p.b. 1230, Russia*

Some methodical problems on the estimation of permafrost state in different geostructures of Sakha-Yakutia have been considered on the basis of geothermal data. The relationship between thermal flows in frozen ( $q_m$ ) and underlying unfrozen rocks ( $q$ ) in Anabar antecline and Verkhoyan-Kolyma fold system is close or equal to 1, i.e. the geothermal field of the permafrost is in accordance with climatic and inner-earth thermal conditions in spite of the fact that the tectonic and energy state of these geostructural blocks is different. This is testified by the range of thermal flows in the frozen and underlying unfrozen rocks: the value of thermal flow is 10—30 mW/m<sup>2</sup> in the former and — 50—100 mW/m<sup>2</sup> in the latter. In geostructural blocks of the Viluy syncline and pre-Verkhoyan trough the relationship between  $q_m$  and  $q$  changes from 0 to 1, which suggests a discrepancy of geothermal field and permafrost thickness with modern climatic and Earth interior thermal conditions.

*Permafrost, thermal flow, temperature, geostructure, Yakutia*

Проблема глобального потепления климата и всевозрастающего техногенного воздействия на природную среду обуславливают необходимость исследования изменений в окружающей среде. Криолитозона распространена на большей половине России и изучение ее состояния и прогноз развития представляет важное направление в приоритетных научных исследованиях.

В настоящее время почти повсеместно наблюдается повышение температуры как земной поверхности, так и в криолитозоне, что подтверждается данными измерений теплового потока в мерзлой толще и подстилающих немерзлых породах в Сибири [Иванов, 1963; Мельников и др., 1972; Балобаев, 1991; Девяткин, 1993; Дучков и др., 1995]. При этом многие данные свидетель-

ствуют о деградиционном характере криогенных процессов в мерзлой толще. В настоящей статье рассматриваются некоторые методические вопросы оценки состояния криолитозоны в пределах Саха-Якутии на основе геотермических данных.

Как известно, показателем нестационарного или стационарного режима температурного поля криолитозоны служит величина перепада между тепловыми потоками — внутриземным ( $q$ ) и в мерзлой толще ( $q_m$ ) вблизи подошвы криолитозоны. При  $q = q_m$  фиксируется стационарный режим геотемпературного поля криолитозоны, а при остальных условиях — нестационарный режим [Общее мерзлотоведение, 1974].

Рассмотрим характер и темп дегградации мерзлых толщ на территории Саха-Якутии на

основе отношения величин тепловых потоков в мерзлой и подстилающей немерзлой толщах литосферы ( $n = q_m : q$ ). Для этого воспользуемся сведениями о величинах теплового потока и мощности мерзлых толщ, полученных в результате проведения геотермических измерений, а также опубликованных в виде каталогов и карт [Каталог данных..., 1985; Карта теплового потока..., 1991; Геокриологическая карта..., 1996].

Исследуемая часть территории включает в себя различные геоструктуры восточной части Сибирской платформы и Верхояно-Чукотской складчатой области: Анабарскую и Алданскую антеклизы, Вилюйскую синеклизу, Лено-Анабарский и Предверхоанский прогибы, Верхояно-Колымскую складчатую систему и др. Состав отложений и их возраст весьма разнообразен: от дисперсных до скальных пород (кайнозойской-протерозойской эратем), что обуславливает широкий диапазон коэффициента теплопроводности горных пород от 1.5 до 6 Вт/(м×К) и величин геотермического градиента (5—50 мК/м). Количественная оценка величины теплового потока зависит от инструментальной точности измерения его составляющих (геотермический градиент

и теплопроводность пород) и проводится с погрешностью  $\pm 10\pm 15\%$ , т.е.  $\pm 5\pm 7$  мВт/м<sup>2</sup>. Это позволяет выделять особенности теплового потока при его величине более 10—15 мВт/м<sup>2</sup>.

Основным фактором, влияющим на величину и распределение теплового потока в криолитозоне, является периодическое колебание климата длиннопериодного характера, выражающееся протаиванием (или промерзанием) массива горных пород и понижением (или повышением) в нем величины теплового потока. Особенно это влияние заметно на границе раздела мерзлых и талых пород песчано-глинистого состава.

При расчете теплового потока необходимо учитывать также и такие искажающие факторы как: бурение скважины; тепловая конвекция заполнителя и обсадная труба в стволе скважины; влажность (льדיстость) и плотность пород; река, озеро и болотная система; разновысотный рельеф в горных районах; инфильтрация атмосферных осадков и подземные воды; внедрение крупных рудных и нерудных тел, тектонические разломы и др. (таблица). Характер влияния указанных факторов по глубине и латерали может быть учтен введением поправок с использованием

Факторы, влияющие на величину теплового потока в криолитозоне (КЛЗ)

Фактор	Характер влияния	Рекомендации к измерению теплового потока
Климатический (основной)	Повышение (понижение) температуры и протаивание (промерзание) пород	Определить (в скважине с восстановленной температурой) величины тепловых потоков в мерзлой ( $q_m$ ) и подстилающей немерзлой ( $q$ ) толщах литосферы и их соотношение $n = q_m : q$ . При $n = 0$ и $n < 1$ — деградация, при $n > 1$ — аградация, при $n = 1$ — стационарное температурное поле КЛЗ
Бурение скважины	На температуру пород, величину и направление геотермического градиента до забоя скважины	Наблюдения за выстойкой температуры; расчет геотермического градиента (методом 2—3 термограмм) при времени выстойки = ∞
Свободная тепловая конвекция заполнителя и обсадная труба в скважине	Переменные по величине и знаку вариации градиента температуры в слое пород с годовыми теплооборотами	Ниже подошвы указанного слоя. Выше этого слоя — оценка влияния факторов с использованием аналитических зависимостей
Влажность (льдистость), пористость, плотность и температура пород	Изменение величины коэффициента теплопроводности пород	Теплопроводность керна определяется в лабораторных условиях при полном влагонасыщении и естественной температуре пород
Озеро, река, болотная система	Протаивание пород, изменение величины и направления геотермического градиента	Вне указанных объектов
Разновысотный рельеф в горных районах	Величина теплового потока уменьшается под вершинами гор и повышается в межгорных долинах	На середине склона гор или как среднее под вершиной горы и у ее подножия. Использование электромоделирования
Внедрение кимберлитового тела	Понижение температуры внутри объекта	Вне указанного тела
Инфильтрация атмосферных осадков, подземные воды, криопэги	При температуре воды под подошвой КЛЗ 0—4 °С и в криопэгах — конвективная составляющая теплового потока отсутствует	Ниже подошвы с годовыми теплооборотами
Вертикальные зоны деструкции, формирование или разложение газогидратов, эффект охлаждения газа при бурении	Временные локальные нарушения температуры пород	Проведение измерений в скважинах с восстановленным температурным режимом
Разломы с выносом геотермального тепла	Повышение температуры пород, возникновение сквозных таликов	Вне объекта

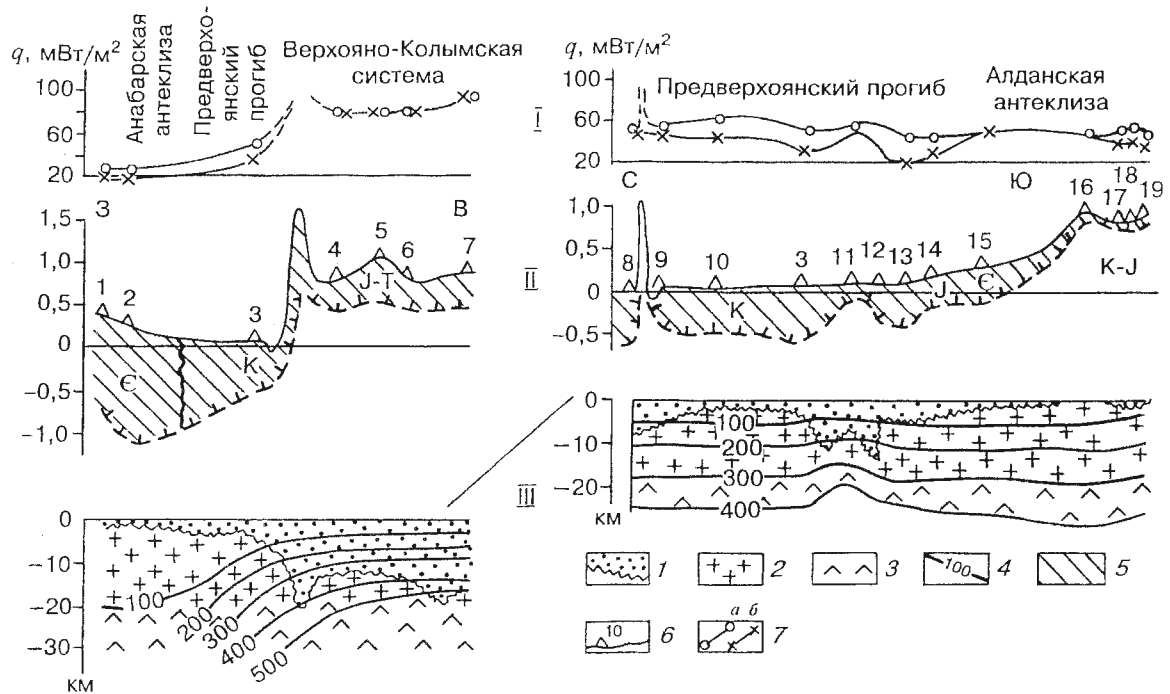


Рис. 1. Тепловой поток (I), криолитозона (II) и строение земной коры (III) в пределах различных геоструктур Сибири.

1 — осадочный чехол; 2 — гранитный слой; 3 — базальтовый слой; 4 — изотерма в °С; 5 — криолитозона; 6 — геотермические участки на профилях А-А и Б-Б (см. рис. 2): 1 — Удачный, 2 — Мархинский, 3 — Бахынай, 4 — Звездочка, 5 — Алыс-Хая, 6 — Сентачан, 7 — Сарылах, 8 — Тикси, 9 — Дьяпальский, 10 — Джарджанский, 11 — Собо-Хаинский, 12 — Олойский, 13 — Намский, 14 — Кенкеме, 15 — Амгинский, 16 — Селигдарский, 17 — Чульмаканский, 18 — Денисовский, 19 — Нерюнгринский; 7 — тепловой поток: а) внутриземной, б) в криолитозоне.

имеющихся аналитических выражений или рекомендаций, полученных на основе длительных режимных геотермических наблюдений и результатов численного и электрического моделирования [Кутасов, 1971; Методические..., 1983; Тепловое поле..., 1987; Девяткин, 1993].

Планомерное изучение теплового потока в мерзлой толще Якутии проводится с начала 1960 г. Н.С. Иванов [Иванов, 1963] на основе анализа результатов геотермических и теплофизических исследований в окрестностях Якутска отметил, что величина теплового потока в мерзлой толще заметно ниже среднеконтинентального значения внутриземного теплового потока. Последующие геотермические измерения, выполненные в ряде глубоких скважин с учетом их длительной выстойки, позволили не только подтвердить предположение Н.С. Иванова, но и получить новые сведения о характере распределения и соотношении тепловых потоков в мерзлой и талой толщах литосферы в различных районах Якутии (рис. 1, 2).

Так, например, для Анабарской антеклизы и Верхояно-Колымской складчатой системы характерны соотношения между тепловыми потоками  $q_M/q$  близкими или равными 1, т.е. геотем-

пературное поле криолитозоны находится в соответствии с климатическими и внутриземными тепловыми условиями, несмотря на то, что тектоническое и энергетическое состояние этих двух геоструктурных блоков весьма различно. Об этом свидетельствуют и диапазон величин тепловых потоков в мерзлых и подстилающих немерзлых толщах: в первом из этих блоков величина теплового потока варьирует в пределах 10—30 мВт/м², а во втором — 50—100 мВт/м².

В геоструктурных блоках Вилюйской синеклизы и Предверхо-янского прогиба соотношение между тепловыми потоками  $q_M/q$  варьирует в пределах от 0 до 1, что свидетельствует о несоответствии геотемпературного поля и мощности криолитозоны современным климатическим и внутриземным тепловым условиям. Величина теплового потока в мерзлой толще колеблется от 0 до 55 мВт/м², а под подошвой криолитозоны от 30 до 55 мВт/м². Мерзлая толща в пределах этих структур в современное время деградирует, при этом она протаивает как сверху, так и снизу. Указанное состояние вызвано последствиями палеоклиматического потепления и внутриземного тепла и, возможно, воздействиями техногенных факторов. Фиксирование

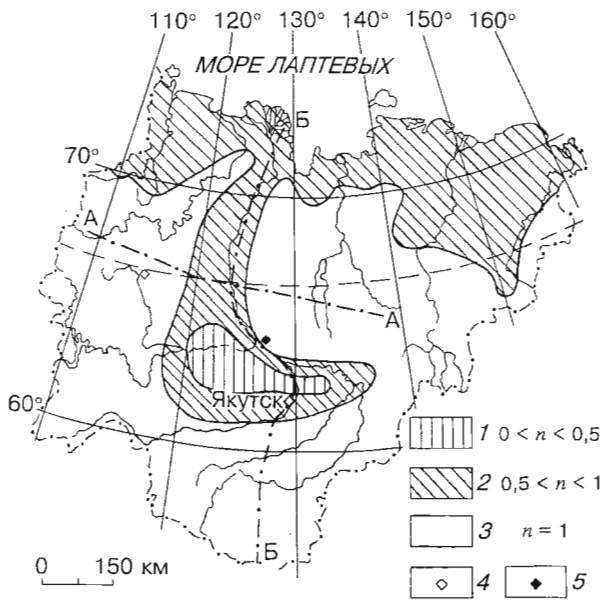


Рис. 2. Пределы изменения соотношений тепловых потоков в мерзлой и подстилающей немерзлой толщах литосферы восточной части Сибирской платформы и Верхояно-Колымской складчатой системы.

1—3 —  $n = q_m : q$ ; 4 — участок Мархинский с мощностью криолитозоны 1500 м; 5 — участок Китчанский со сквозной таликовой зоной.

этого явления стало возможным благодаря длительному протеканию фазового перехода льда в воду при протаивании слаблитифицированных и высокольдистых мерзлых толщ в геоструктурах осадконакопления.

В более древних плотных и малольдистых горных породах Анабарской антеклизы и Верхояно-Колымской складчатой системы повышение температуры и уменьшение мощности мерзлых толщ при глобальном потеплении климата в основном происходит без заметного скачка величины внутриземного теплового потока на границе раздела мерзлых и талых пород. В этом случае, для фиксации изменения температуры пород, движения подошвы криолитозоны и вариаций величины теплового потока, необходимо

метеорологические наблюдения дополнить режимными геотермическими.

В заключение следует отметить, что выявлению соотношения тепловых потоков должны предшествовать поинтервальные отслеживания величин и направлений тепловых потоков: в деятельном слое; в интервале от подошвы деятельного слоя до подошвы с годовыми теплооборотами; в интервале от подошвы последнего слоя до подошвы криолитозоны и, наконец, в подстилающих немерзлых толщах литосферы. Сравнение поинтервального изменения величин соотношения между тепловыми потоками по глубине позволит более детально изучить состояние криолитозоны и прогноз ее развития в условиях воздействия климатических и внутриземных и иных факторов.

### Литература

- Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.
- Геокриологическая карта бывшего СССР, м-б 1:2 500 000 / Отв. ред. Э.Д. Ершов. М., МГУ, 1996.
- Девяткин В.Н. Тепловой поток литосферы Сибири. Новосибирск, Наука, 1993, 165 с.
- Дучков А.Д., Балобаев В.Т., Девяткин В.Н. и др. Геотермическая модель криолитозоны Западной Сибири // Геология и геофизика, 1995, № 8, с. 72—81.
- Иванов Н.С. О тепловом режиме верхнего слоя земной коры в районе Якутска // Тепло- и массообмен в мерзлых толщах земной коры. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 9—55.
- Каталог данных по тепловому потоку Сибири / Ред. А.Д. Дучков. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1985, 92 с.
- Карта теплового потока территории СССР, м-б 1:5 000 000 / Ред. В.В. Гордиенко, У.И. Моисеенко. Киев-Ленинград, Ин-т геофизики АН Украины, ВНИГИ МГ СССР, 1991.
- Кутасов И.М. Определение температуры горных пород при недостаточной выстойке скважины // Разведка и охрана недр, 1971, № 2, с. 32—36.
- 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.
- Методические и экспериментальные основы геотермии / Под ред. П.Н. Кропоткина, Я.Б. Смирнова. М., Наука, 1983, 232 с.
- Общее мерзлотоведение / Отв. ред. П.И. Мельников и Н.И. Толстихин. Новосибирск, Наука, 1974, 291 с.
- Тепловое поле недр Сибири / Отв. ред. А.Д. Дучков. Новосибирск, Наука, 1987, 196 с.

Поступила в редакцию  
28 сентября 1997 г.