

# КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 4, с. 3–15

<https://www.sibran.ru>

## ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК: 551.343  
DOI: 10.15372/KZ20240401  
EDN: XUICXA

### КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОЖИДАЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЮЖНОЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Н.М. Бердников

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,  
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

E-mail: nikolaj-berdnikov@yandex.ru

В эпоху современных климатических изменений в Западной Сибири с поверхности происходит деградация многолетнемерзлых пород, проявляющаяся в повышении их температуры, сокращении площади распространения и уменьшении мощности. Для установления темпов сокращения площади распространения многолетнемерзлых пород была создана картографическая модель прогнозируемого изменения положения их южной границы к середине XXI столетия. На основе учета температуры, льдистости, состава пород и строения разреза проведено ранжирование участков южной части криолитозоны по очередности многолетнего оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи. Установлено, что ожидаемое изменение южной границы криолитозоны Западной Сибири будет носить неравномерный характер и зависеть от местных условий, связанных с криолитогенной основой ландшафта.

**Ключевые слова:** южная граница многолетнемерзлых пород, картографическая модель, изменение климата, оттаивание мерзлоты с поверхности, слой годовых колебаний температуры.

**Ссылка для цитирования:** Бердников Н.М. Картографическая визуализация ожидаемого изменения южной границы области распространения многолетнемерзлых пород в Западной Сибири // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 4, с. 3–15. DOI: 10.15372/KZ20240401. EDN: XUICXA.

### CARTOGRAPHIC VISUALIZATION OF THE EXPECTED CHANGE IN THE SOUTHERN PERMAFROST LIMIT IN WESTERN SIBERIA

N.M. Berdnikov

Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia

E-mail: nikolaj-berdnikov@yandex.ru

In the context of modern climate change, permafrost degradation from the surface takes place in Western Siberia. This is manifested by an increase in temperature and a decrease in the area of distribution and thickness of frozen layers. To establish the rate of reduction in permafrost area, a cartographic model was created to predict the change in the position of its southern limit by the middle of the 21st century. Based on temperature, ice content, rock composition, and section structure data, permafrost areas were ranked concerning the thawing rate of the upper 10-m-thick permafrost layer. It was found that the expected change in the southern limit of permafrost in Western Siberia will be uneven and dependent on the local conditions related to the cryolithogenic foundation of the landscape.

**Keywords:** southern permafrost limit, cartographic model, climate change, permafrost degradation from surface, annual temperature fluctuations layer.

### ВВЕДЕНИЕ

Деградация криолитозоны при потеплении климата сопровождается повышением температуры многолетнемерзлых пород (ММП) и сокращением площади их распространения. В данной работе рассматривается динамика южной границы области распространения мерзлых толщ.

Согласно В.А. Кудрявцеву, южную границу распространения мерзлых толщ можно определить “и по крайнему положению мерзлых толщ, и по среднему положению нулевой геоизотермы” [Общее мерзлотоведение, 1978, с. 297]. При мелко-масштабном картировании отрисовать южную

границу островов ММП не представляется возможным из-за отсутствия актуальных региональных данных. Указать на мелкомасштабной карте геоизотерму 0 °C можно весьма условно, так как температуру, близкую к нулю, имеют ММП в широкой полосе, расположенной вдоль всей южной границы криолитозоны.

“Вдоль южной границы вечной мерзлоты гоподствуют близкие к 0 °C температуры ММП и происходит замедление тренда повышения температуры мерзлых грунтов за счет затрат тепла на фазовые переходы” [Бердников и др., 2022, с. 516]. Таким образом, реакция южной части криолитозоны на потепление климата будет проявляться в

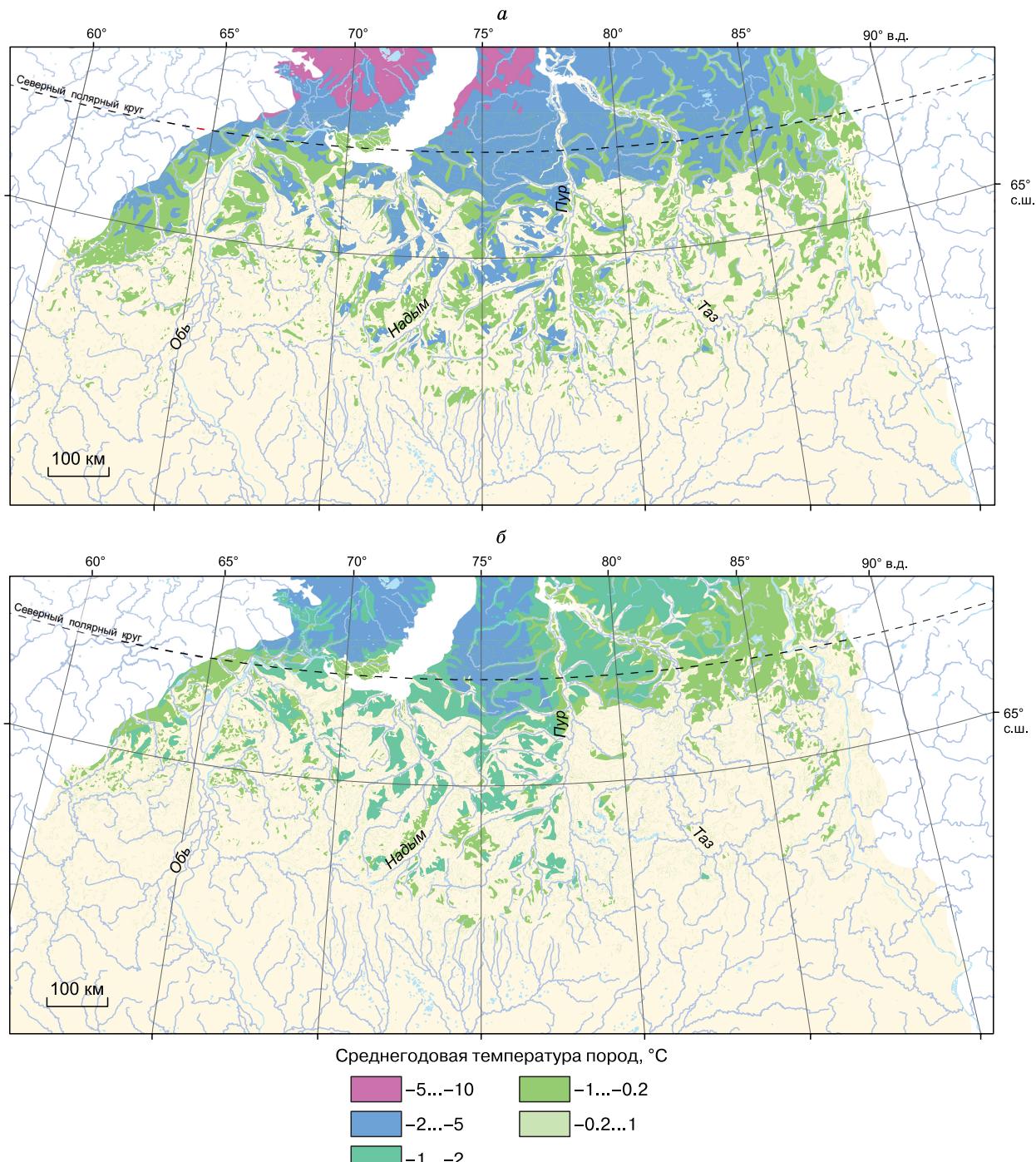


Рис. 1. Изменение распространения многолетнемерзлых пород вблизи южной границы и среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород в период с 2000 (а) по 2050 г. (б).

меньшей степени за счет повышения температуры ММП (рис. 1) и в большей степени за счет протаивания мерзлых толщ. Деградация криолитозоны вблизи ее южной границы будет проявляться через опускание кровли ММП и сокращение площади массивов мерзлых пород.

В основу исследования положен анализ цифровой версии карты генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты масштаба 1:1 000 000 [Карта генетических..., 1991], а также динамической картографической модели среднегодовой температуры ММП [Бердников и др., 2022], созданной на основе Геокриологической карты СССР масштаба 1:2 500 000 [Геокриологическая карта..., 1991]. Для реализации создана динамическая картографическая модель, которая характеризует температуру ММП на глубине 10–15 м (приблизительно на подошве слоя годовых теплооборотов). На ее основе более корректно характеризовать изменение геофизической южной границы мерзлоты, а не географической.

Под географической южной границей мерзлоты понимается “линия, оконтуривающая с юга острова ММП”, а под геофизической южной границей мерзлоты понимается “среднее многолетнее положение нулевой геоизотермы у подошвы слоя годовых колебаний температуры” [Геокриологический словарь, 2003, с. 18].

Следует также учитывать, что в южных районах распространения ММП ярус годовых теплооборотов обычно меньше 10–15 м и может составлять 5–7 м (например, в суглинистых и оторфованных грунтах) [Объяснительная записка..., 1991]. Поскольку пространственно-временная изменчивость толщины слоя годовых колебаний температуры значительна, рассматривается первоочередность таяния ММП в слое фиксированной глубины 10 м.

В основе прогноза лежит “средний” сценарий изменения климата РТК 4.5 (РТК – репрезентативная траектория концентрации парниковых газов) по данным карт прогнозируемого изменения среднегодовой температуры воздуха, представленных Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Войкова. Соответствующая интерактивная карта прогноза приземной температуры воздуха создана на базе ансамбля глобальных климатических моделей, включенных в 5-й оценочный доклад МГЭИК [МГЭИК, 2014]. Поэтому предлагаемый прогноз нового положения южной границы распространения мерзлых толщ носит вероятностный характер и, по мнению авторов, подходит для общих оценок ожидаемой деградации криолитозоны.

На основе обобщения полевых и метеорологических данных А.В. Павлов и Г.В. Малкова [2009] рассматривают конкретные реализации

третьего закона Фурье, согласно которому поверхность возмущающий тепловой импульс затухает с глубиной, показывая зависимость скорости этого затухания от темпа потепления климата, ландшафтной дифференциации территории, литологического разреза, исходного термического состояния грунтов и других природных факторов. Согласно [Дроздов и др., 2010], “несмотря на потепление климата и наблюдающееся повышение температуры ММП на территории Уренгойского НГКМ, инструментально зафиксированы лишь единичные случаи перехода ММП в талое состояние по всей мощности слоя годовых теплооборотов” (с. 30). Ю.К. Васильчуком [2013] отмечено, что массивы многолетнемерзлых грунтов, возникшие вблизи южной границы криолитозоны в течение холодных фаз естественных климатических колебаний с периодом 30–40 лет, обладают высокой инерционностью и во время более теплой фазы они могут не протаивать.

Инерционность отклика криолитозоны на потепление климата может возрастать за счет того, что фронт протаивания достигает льдистого горизонта и увеличиваются затраты тепла на фазовые переходы “лед–вода”, или, наоборот, может снижаться при достижении уже оттаявшего слоя засоленных пород.

Характер изменения геофизической южной границы вечной мерзлоты достаточно сложный. Неравномерность ее отступания к северу во многом будет определяться уникальным сочетанием физико-географических условий на уровне различий между ландшафтными единицами низкого иерархического уровня – фациями и уроцищами, причем в пределах некоторых из них острова мерзлоты будут сохраняться длительное время.

### Методика моделирования изменения положения южной границы криолитозоны

**Основные положения.** Как было установлено, ММП с оклонулевыми температурами при прочих равных условиях обладают повышенной инерционностью реакции температурного поля на потепление климата. При продолжающемся потеплении климата температура на подошве слоя ее годовых колебаний на долгие годы принимает значения, близкие к нулю. Учитывая локальные ландшафтно-геологические особенности, на этом фоне можно выделить области и острова ММП, которые в условиях потепления климата первыми подвергнутся протаиванию на всю глубину слоя годовых колебаний температуры. Тем самым можно охарактеризовать вероятное ожидаемое изменение южной геофизической границы распространения ММП.

По данным Д.С. Дроздова с соавт. [2017], в последнее десятилетие опущенная кровля и несливающаяся мерзлота наблюдаются уже не толь-

ко в северной тайге и в лесотундре, но местами и в южной тундре, что свидетельствует о протаивании пород верхней 10-метровой части разреза в полосе шириной около 200 км с юга на север. Поэтому визуализацию прогнозной южной границы криолитозоны предпочтительнее прослеживать не в виде конкретной сплошной линии, а как новое положение отрезков границ южных островов ММП.

Графически положение этих отрезков можно получить при наложении и совмещении двух карт: карты генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты масштаба 1:1 000 000 [Карта генетических..., 1991] и динамической картографической модели среднегодовой температуры ММП [Бердников и др., 2022], которые дают новую контурную рабочую основу. В соответствии с этой схемой для области распространения ММП с температурой выше  $-1^{\circ}\text{C}$  (в которой деградация ММП за счет опускания кровли мерзлоты будет происходить наиболее интенсивно, а за счет повышения температуры пород – минимально интенсивно) было произведено ранжирование участков поверхности путем назначения баллов по ожидаемой интенсивности многолетнего оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи на основе учета состава и льдистости

пород, строения разреза, а также среднегодовой температуры пород (степени близости температуры ММП к  $0^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 2).

**Покомпонентное задание баллов интенсивности оттаивания.** Каждому участку карты со среднегодовой температурой выше  $-1^{\circ}\text{C}$  был присвоен балл, пропорциональный устойчивости к оттаиванию с поверхности, в зависимости от льдистости ( $B_A$ ), состава пород и строения разреза ( $B_B$ ), наличия торфяного покрова ( $B_B$ ), среднегодовой температуры пород ( $B_G$ ). Диапазон значений присваиваемых баллов отражает значимость учитываемой компоненты:  $B_A = 1\dots 5$ ;  $B_B = 0.6\dots 5$ ;  $B_B = 0$  или 1;  $B_G = 1\dots 3$ . Соответственно, суммарный балл можно рассматривать как ожидаемую очередь оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи для каждого участка (контура на карте). Чем больше величина балла, тем медленнее протаивает верхняя 10-метровая часть толщи.

**Балл по льдистости.** Максимальная интенсивность оттаивания будет характерна для слабольдистых ( $L < 0.2$ ) песков с отсутствием торфяного покрова ( $L$  – льдистость). На таких участках ММП будут в первую очередь оттаивать на всю глубину верхней 10-метровой части толщи. Минимальная интенсивность оттаивания ожидается на участках, сложенных сильнольдистыми ( $L > 0.4$ )

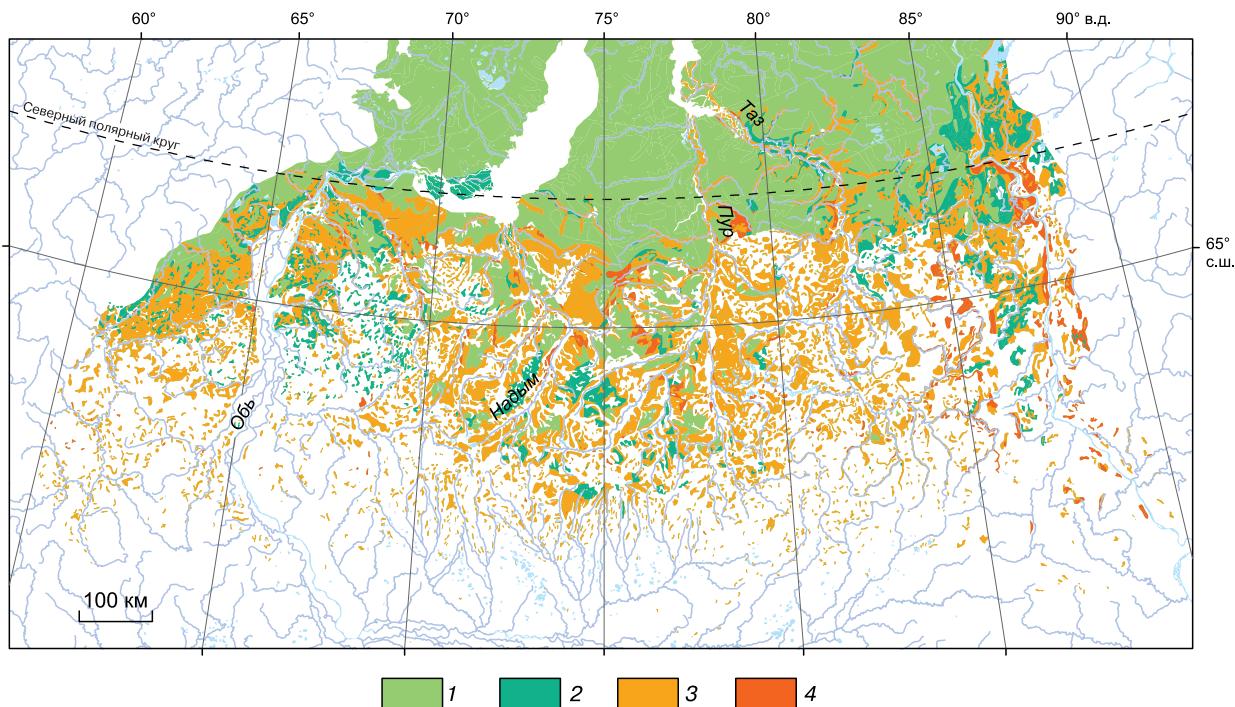


Рис. 2. Схематическая карта ожидаемой интенсивности многолетнего оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи в южной криолитозоне (с температурами ММП выше  $-1^{\circ}\text{C}$ ), учитывающая состав и льдистость пород, строение разреза, а также среднегодовую температуру грунтов.

1 – участки ММП со среднегодовой температурой ниже  $-1^{\circ}\text{C}$ ; 2 – участки с медленно протаивающими ММП; 3 – участки со средней скоростью протаивания ММП; 4 – участки с быстро протаивающими ММП.

глинистыми отложениями с мощным торфяным покровом, где протаивание ММП верхней 10-метровой части толщи будет происходить дольше всего. Таким образом, охарактеризовав интенсивность многолетнего оттаивания ММП для различных участков, можно определить, какие из островов мерзлоты близ южной границы криолитозоны оттают в первую очередь, а какие за более длительный срок (см. рис. 2).

Для участков со слабольдистыми породами ( $L < 0.2$ ) балл за счет льдистости составляет 1, для участков с льдистыми породами ( $0.2 < L < 0.4$ ) равен 3, а для участков с сильнольдистыми породами ( $L > 0.4$ ) – 5.

**Балл по геолого-геокриологическому строению разреза.** При потеплении климата для разрезов с различным строением и составом отложений будет характерна разная скорость оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи.

Согласно свойству теплопроводности, если тело имеет неравномерную температуру, то в нем возникают тепловые потоки, направленные от точек с более высокой температурой к точкам с более низкой. В общем случае количество тепла  $Q$ , протекающее за некоторый промежуток времени ( $\tau_1, \tau_2$ ) через сечение  $z$ , равно [Общее мерзлотоведение, 1978]

$$Q = -F \int_{\tau_1}^{\tau_2} \lambda(z) \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} d\tau. \quad (1)$$

Формула (1) хорошо объясняет все составляющие в процессе аккумуляции тепла при многолетнем оттаивании толщи. По ней можно оценить время и очередность оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи.

Формула (1) взаимоувязывает количество тепла  $Q$ , необходимого для нагревания и протаивания толщи, с площадью, через которую проходит теплопоток ( $F$  – площадь), теплопроводностью  $\lambda$  и температурой ММП  $t$ , а также периодом времени  $\tau$ , в течение которого протаивает толща. В качестве начальной даты, относительно которой оцениваются изменения положения южной границы распространения ММП, автор рассматривает 2000 год. В 2000 г. на некоторых участках оттаивание шло уже давно, на некоторых – только началось, на остальных лишь ожидалось.

Вероятно, первые из них в первую очередь и оттают, остальные – позже. Типичный пример – это участки, где мерзлые песчаные и глинистые породы перекрыты 5–8-метровым слоем талых пород (табл. 1).

Однако в зависимости от конкретных условий предложенная очередность оттаивания может меняться. Особенно сильно оказывается мозаичность сочетания мерзлых и оттаявших пространств (2D). Очередность оттаивания целесообразно охарактеризовать с привязкой к следующим

типовым геокриологическим разрезам: а) разрез с выдержанной по простирию сливющейся мерзлотой; б) разрез со сливющейся мерзлотой, чередующейся на небольших участках с талыми породами; в) разрез с глубоким залеганием кровли мерзлоты (до 8 м); г) разрез со сливющейся мерзлотой с двуслойным строением либо с переслаиванием горизонтов различной литологии. При назначении соответствующего балла ( $B_B$  – зависимость от состава пород и строения разреза) необходимо ориентироваться на формулу (1), которая показывает, от чего зависит количество тепла, поступающего в мерзлые породы. Для характеристики рассматриваемых разрезов из этой формулы наиболее важными являются: время начала оттаивания ММП, площадь теплообмена мерзлых грунтов с талыми породами и теплопроводность пород, зависящая от их состава и геологического строения.

Первыми оттают те участки, где процесс протаивания пород верхней 10-метровой части толщи начался намного раньше, чем в первый год исследуемого периода (2000–2050 гг.). Это песчаные и глинистые породы, перекрытые 5–8-метровым слоем талых пород (см. табл. 1). Оттаивание таких участков уже происходило в течение определенного времени к началу 1980-х гг. (т. е. на момент создания карты, положенной в основу модели прогнозируемого положения южной границы ММП [Карта генетических..., 1991]). Таким образом, на подобных участках значительную роль будет играть фактор времени оттаивания ( $\tau$ ). Поэтому

Таблица 1. Очередность оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи в баллах в зависимости от геолого-геокриологического строения

Геолого-геокриологическое строение	Балл $B_B$ *
Песчаные породы, перекрытые 5–8-метровым слоем талых пород	0.5
Глинистые породы, перекрытые 5–8-метровым слоем талых пород	0.6
Мерзлые песчаные породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	0.8
Мерзлые глинистые породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	0.9
Песчаные породы	1.0
Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием песчаных пород	1.4
Глинистые породы мощностью 1–5 м, перекрывающие песчаные	1.4
Песчаные породы мощностью 3–5 м, перекрывающие глинистые	1.5
Глинистые породы	2.0

\* Чем больше величина балла, тем медленнее протаивает верхняя 10-метровая часть толщи.

ММП на участках с таким строением разреза должны протаять раньше, чем на участках со сливающейся мерзлотой.

Затем протают песчаные и несколько позднее глинистые породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурой ММП, близкой к 0 °C). Такие участки характеризуются сливающейся мерзлотой. Для подобных небольших массивов ММП, окруженных талыми породами, будут характерны повышенные боковые теплопотоки и скорость протаивания пород верхней 10-метровой части толщи будет выше, чем на участках с мерзлыми толщами, выдержанными по простиранию. В данном случае ведущую роль будет играть фактор площади теплообмена мерзлых массивов с талыми породами ( $F$ ).

Затем будут протаивать разрезы с выдержанной по простиранию сливающейся мерзлотой. Здесь не наблюдается частого чередования ММП с талыми породами. На таких участках факторы времени оттаивания  $\tau$  и площади теплообмена  $F$  не будут оказывать столь значительного влияния на скорость таяния мерзлых массивов. Ведущая роль будет принадлежать факторам, связанным с теплопроводностью пород  $\lambda$  и строением разреза.

Среди таких участков породы верхней 10-метровой части толщи протают в первую очередь в разрезах, полностью сложенных песчаными породами. Далее протают переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием песчаных пород, а также глинистые породы мощностью 1–5 м, перекрывающие песчаные. Затем произойдет протаивание разреза из песчаных пород мощностью 3–5 м, перекрывающих глинистые. Позже всего протает однородный глинистый разрез.

Очередность оттаивания для группы неоднородных литолого-стратиграфических толщ должна быть рассмотрена и обоснована отдельно.

При ранжировании участков с двуслойным геологическим строением по очередности многолетнего оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи учитывалось неоднородное строение разреза мерзлой толщи. В основу ранжирования положен принцип оценки мощности мерзлых толщ, предложенный В.А. Кудрявцевым [Общее мерзлотоведение, 1978]. Классик мерзлотоведения отмечает изменение мощности мерзлых толщ в зависимости от соотношения значений теплопроводности при двуслойном геологическом строении (рис. 3).

Процесс промерзания неоднородных литолого-стратиграфических толщ происходит отлично от промерзания однородных отложений. Если взять двуслойное геологическое строение толщи, где теплопроводность верхнего слоя ( $\lambda_1$ ) существенно отличается от теплопроводности нижнего подстилающего слоя ( $\lambda_2$ ), то мощности мерзлых

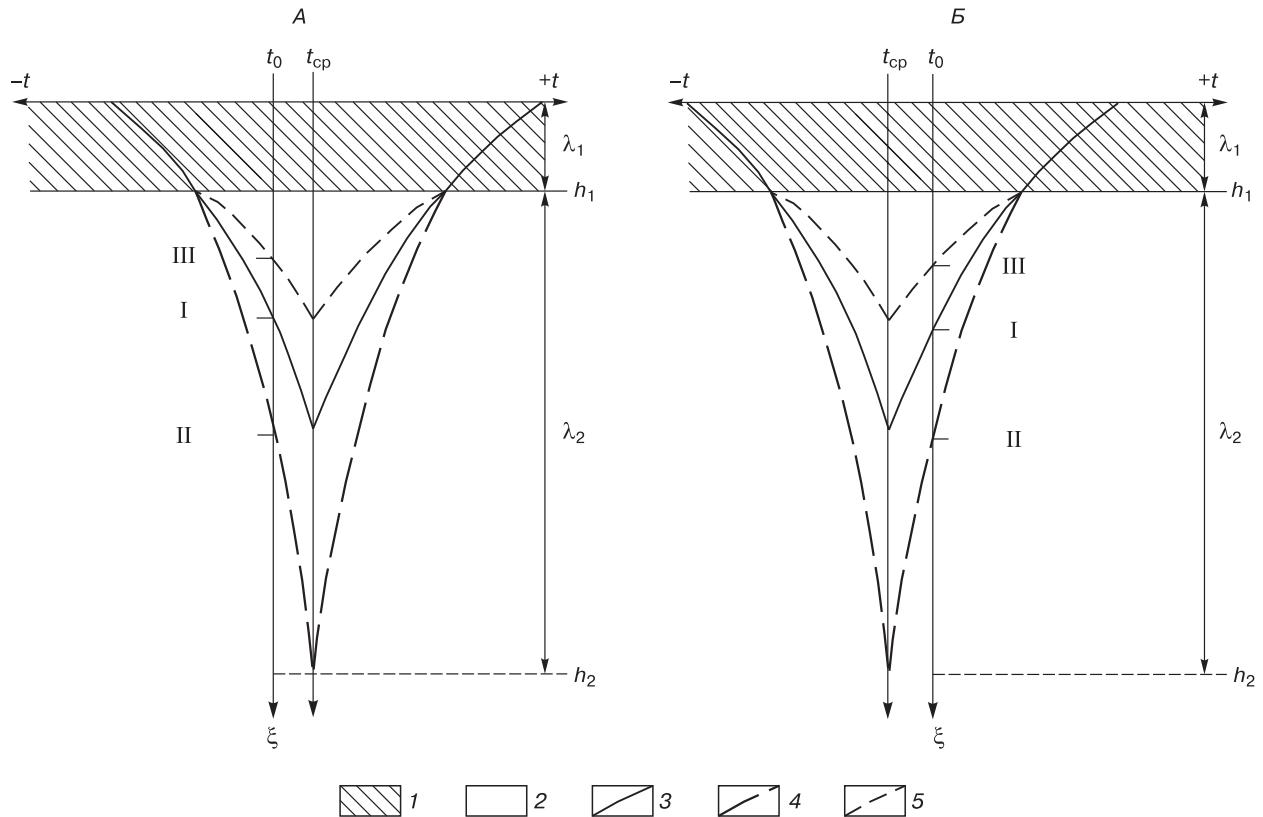
пород будут зависеть от соотношения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ” [Общее мерзлотоведение, 1978]. В.А. Кудрявцев отмечает, что при  $\lambda_1 > \lambda_2$  мощности мерзлых толщ будут меньше (см. рис. 3, А, III), чем при  $\lambda_1 = \lambda_2$  (рис. 3, А, I), а при  $\lambda_1 < \lambda_2$  они будут больше (рис. 3, А, II).

По аналогии с многолетним промерзанием можно на качественном уровне охарактеризовать мощность слоя многолетнего оттаивания в зависимости от соотношения значений теплопроводности при двуслойном геологическом строении (см. рис. 3).

Многолетнее оттаивание неоднородных литолого-стратиграфических толщ происходит отличично от оттаивания однородных отложений. При двуслойном геологическом строении толщи, в которой теплопроводность верхнего слоя значительно отличается от теплопроводности нижнего подстилающего слоя, мощность слоя многолетнего оттаивания будет зависеть от  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . При  $\lambda_1 > \lambda_2$  мощности слоя многолетнего оттаивания будут меньше (рис. 3, Б, III), чем при  $\lambda_1 = \lambda_2$  (рис. 3, Б, I), а при  $\lambda_1 < \lambda_2$  они будут больше (рис. 3, Б, II).

В случае, когда в разрезе песок залегает под глиной, глубина слоя многолетнего оттаивания должна быть больше, чем если бы разрез был сложен только глиной. Это происходит вследствие того, что оттаивание толщи будет зависеть от теплопроводности талого грунта, а теплопроводность талого песка больше, чем у талой глины. Поэтому разница в льдистости между горизонтами глины и песка будет влиять только на теплоту фазовых переходов. Учитывая, что теплота фазовых переходов при залегании песка под глиной меньше, чем если бы разрез был сложен только глиной, глубина оттаивания будет еще больше, чем в случае без учета фазовых переходов. Таким образом, суммарное влияние эффекта разницы теплопроводности и теплоты фазовых переходов направлено в сторону увеличения мощности слоя многолетнего оттаивания.

Если же в разрезе глина залегает под песком, то оттаивание должно быть меньше, чем в случае однородного песчаного разреза. Это связано с тем, что оттаивание толщи будет определяться теплопроводностью вышележащего талого грунта (теплопроводность талого песка больше, чем у талой глины). Поэтому разница в льдистости будет влиять лишь на количество тепла, необходимого для фазовых переходов. Учитывая, что теплота фазовых переходов при залегании глины под песком больше, чем если бы разрез был однородным и сложен только песком, глубина оттаивания будет еще меньше, чем в случае без учета фазовых переходов. Таким образом, суммарное влияние эффекта разницы теплопроводности и теплоты фазовых переходов направлено в сторону уменьшения мощности слоя многолетнего оттаивания.



**Рис. 3. Изменение мощности мерзлых толщ в зависимости от соотношения значений теплопроводности при двуслойном геологическом строении:**

А – для случая промерзания (по В.А. Кудрявцеву [Общее мерзлотоведение, 1978, с. 297]); глубина слоя многолетнего промерзания: I – при  $\lambda_1 = \lambda_2$ ; II – при  $\lambda_1 < \lambda_2$ ; III – при  $\lambda_1 > \lambda_2$ ; Б – для случая протаивания; глубина слоя многолетнего протаивания: I – при  $\lambda_1 = \lambda_2$ ; II – при  $\lambda_1 < \lambda_2$ ; III – при  $\lambda_1 > \lambda_2$ ;  $-t$  – полуось отрицательных значений температуры пород;  $+t$  – полуось положительных значений температуры пород;  $t_0$  – температура пород равная  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{cp}$  – средняя температура пород (в пределах многолетнего цикла колебаний);  $\lambda_1$  – теплопроводность пород в пределах верхнего горизонта;  $\lambda_2$  – теплопроводность пород в пределах нижнего горизонта;  $\xi$  – глубина;  $h_1$  – глубина подошвы верхнего горизонта;  $h_2$  – глубина подошвы нижнего горизонта (в рамках схемы, предложенной В.А. Кудрявцевым, примерно соответствует глубине затухания цикла многолетних колебаний температуры); 1 – горизонт с теплопроводностью  $\lambda_1$ ; 2 – горизонт с теплопроводностью  $\lambda_2$ ; 3 – огибающие температурных кривых при  $\lambda_1 = \lambda_2$ ; 4 – огибающие температурных кривых при  $\lambda_1 < \lambda_2$ ; 5 – огибающие температурных кривых при  $\lambda_1 > \lambda_2$ .

В соответствии с вышеизложенным было произведено ранжирование участков поверхности, соответствующих контурной основе карты, по ожидаемой интенсивности многолетнего оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи в зависимости от строения разреза.

Таким образом, балл  $B_B$ , присвоенный участкам в зависимости от литологии и строения разреза, учитывает также и возможные варианты неоднородного строения разреза (см. табл. 1), представленные на карте генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты [Карта генетических..., 1991].

В результате совместного учета температуры грунтов, состава и льдистости пород, наличия тор-

фяного покрова, а также строения разреза на разных участках была получена карта вероятного нового положения геофизической южной границы криолитозоны в Западной Сибири для периода ближайших десятилетий (к 2050 г.) по сравнению с ее положением в период 1986–2000 гг. (рис. 4).

Участки со среднегодовой температурой ММП выше  $-1^{\circ}\text{C}$  с медленно протаивающими породами верхней 10-метровой части толщи (см. рис. 2) были отнесены к области распространения многолетнемерзлых пород, которое ожидается для ближайших десятилетий (см. рис. 4).

Участки со среднегодовой температурой ММП выше  $-1^{\circ}\text{C}$  со средней инерционностью протаивания пород и с быстро протаивающими породами 10-метровой части толщи (см. рис. 2)

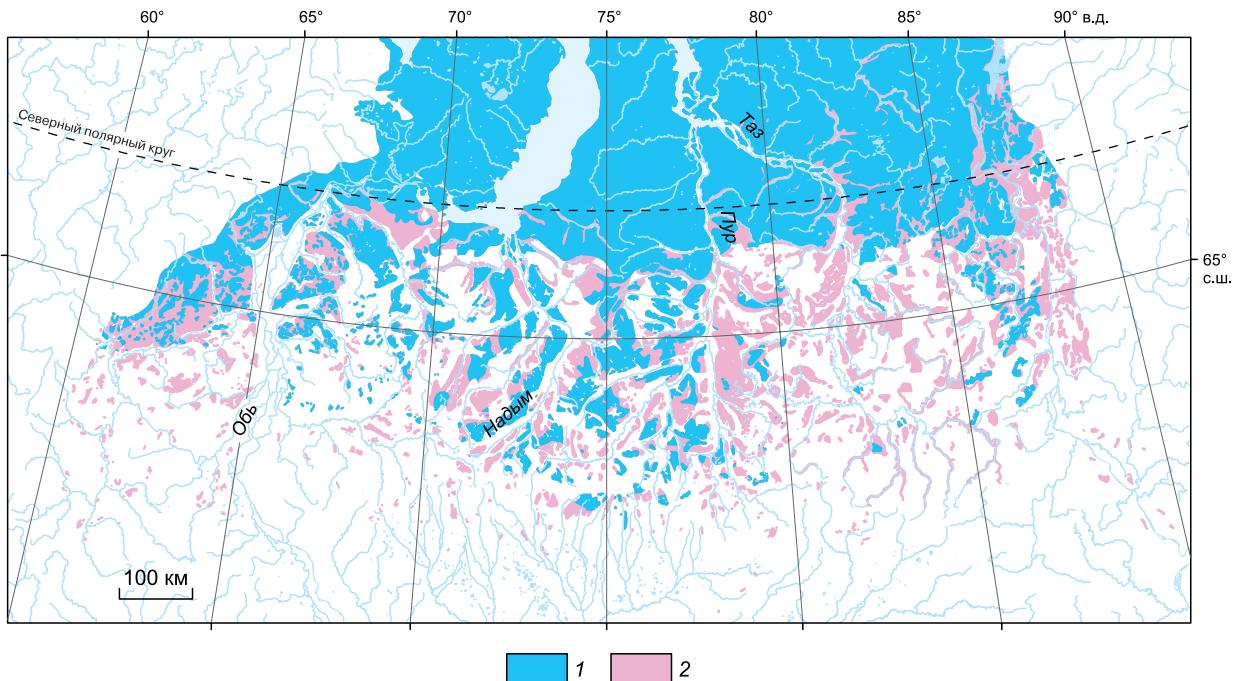


Рис. 4. Карта вероятного нового положения геофизической южной границы криолитозоны в Западной Сибири к 2050 г. (по сравнению с периодом 1986–2000 гг.).

1 – область распространения ММП (ожидаемое положение к 2050 г.); 2 – южная часть области распространения ММП (2000 г.).

были отнесены к области, в пределах которой ожидается полное протаивание ММП на всю мощность верхней 10-метровой части толщи (см. рис. 4).

**Балл по торфу.** В зависимости от наличия или отсутствия торфяного покрова назначался балл 1 или 0 (табл. 2).

**Балл по температуре ММП.** Очередность протаивания приповерхностных пород зависит от близости их температуры к 0 °С. Оценка выполнялась исходя из актуализированных по состоянию на 2020 г. значений среднегодовой температуры ММП. В связи с тем, что температура ММП для однотипных по льдистости и особенностям разреза участков заметно варьирует (от –1 до 0 °С), соответствующие типы участков изначально ранжированы по суммарной балльной оценке только для первых трех показателей  $B_A$ ,  $B_B$ ,  $B_V$  (см. табл. 2). А на этапе составления карты вероятного нового положения южной границы ММП этот суммарный балл корректировался в зависимости от близости современной температуры ММП к 0 °С (т. е. в зависимости от фактора  $B_T$  – линейная интерполяция из условия:  $B_T = 3$  при –1 °С;  $B_T = 1$  при 0 °С). Примеры для нескольких типичных участков в южной криолитозоне Западной Сибири приведены в табл. 3.

**Динамическая картографическая модель среднегодовой температуры мерзлоты.** Изме-

нение среднегодовой температуры ММП в пределах Пур-Надымского междуречья хорошо прослеживается на динамической карте среднегодовой температуры мерзлоты (рис. 5). Карта по состоянию на 1986 г. является цифровой версией Геокриологической карты СССР [Геокриологическая карта..., 1991]. Для последующих временных срезов карты выполнены на основе прогнозной методики [Бердников и др., 2022]. Для создания прогноза температуры ММП использован “средний” сценарий изменения климата (РТК 4.5) по данным карт прогнозируемого изменения среднегодовой температуры воздуха, предложенных Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Войкова. Данная интерактивная карта прогноза приземной температуры воздуха создана на базе ансамбля глобальных климатических моделей, принявших участие в 5-м оценочном докладе МГЭИК. Переход от изменений температуры воздуха к изменению температуры ММП произведен через безразмерный коэффициент (д.е.), отражающий чувствительность мерзлоты к потеплению климата. Данный коэффициент предложен А.В. Павловым, а его пространственные изменения отображены Г.В. Малковой на специальной карте [Павлов, Малкова, 2009]. Коэффициент представляет собой отношение величины тренда повышения среднегодовой температуры ММП к тренду увеличения

Таблица 2. Очередность оттаивания мерзлых пород верхней 10-метровой части толщи в баллах в зависимости от строения разреза, литологии и льдистости пород

Льдистость (от 1 до 5)	Состав (от 0.5 до 2)	Торфяной покров**	Б <sub>А</sub>	Б <sub>Б</sub>	Б <sub>В</sub>	Б <sub>АБВ</sub> *
1	2	3	4	5	6	7
Слабольдистые (Л < 0.2)	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием песчаных пород	0	1	1.4	0	2.4
	Песчаные породы мощностью 3–5 м, перекрывающие глинистые	0	1	1.5	0	2.5
	Глинистые породы	0	1	2	0	3
	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием глинистых пород	0	1	2	0	3
Льдистые (0.2 < Л < 0.4)	Песчаные породы, перекрытые 5–8-метровым слоем талых пород	0	3	0.5	0	3.5
	Глинистые породы, перекрытые 5–8-метровым слоем талых пород	0	3	0.6	0	3.6
	Песчаные породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	0	3	0.8	0	3.8
	Глинистые породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	0	3	0.9	0	3.9
	Песчаные породы	0	3	1	0	4
	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием песчаных пород	0	3	1.4	0	4.4
	Глинистые породы мощностью 1–5 м, перекрывающие песчаные	0	3	1.4	0	4.4
	Песчаные породы мощностью 3–5 м, перекрывающие глинистые	0	3	1.5	0	4.5
	Глинистые породы, перекрытые 5–8-метровым слоем талых пород	1	3	0.6	1	4.6
	Песчаные породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	1	3	0.8	1	4.8
	Глинистые породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	1	3	0.9	1	4.9
	Песчаные породы	1	3	1	1	5
	Глинистые породы	0	3	2	0	5
	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием глинистых пород	0	3	2	0	5
	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием песчаных пород	1	3	1.4	1	5.4
	Глинистые породы мощностью 1–5 м, перекрывающие песчаные	1	3	1.4	1	5.4
	Песчаные породы мощностью 3–5 м, перекрывающие глинистые	1	3	1.5	1	5.5
Сильнольдистые (Л > 0.4)	Песчаные породы, перекрытые 5–8-метровым слоем талых пород	0	5	0.5	0	5.5
	Глинистые породы, перекрытые 5–8-метровым слоем талых пород	0	5	0.6	0	5.6
	Песчаные породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	0	5	0.8	0	5.8
	Глинистые породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	0	5	0.9	0	5.9
Льдистые (0.2 < Л < 0.4)	Глинистые породы	1	3	2	1	6
	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием глинистых пород	1	3	2	1	6
Сильнольдистые (Л > 0.4)	Песчаные породы	0	5	1	0	6
	Глинистые породы мощностью 1–5 м, перекрывающие песчаные	0	5	1.4	0	6.4
	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием песчаных пород	0	5	1.4	0	6.4

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Сильнольдистые ( $L > 0.4$ )	Песчаные породы мощностью 3–5 м, перекрывающие глинистые	0	5	1.5	0	6.5
	Глинистые породы, перекрытые 5–8-метровым слоем талых пород	1	5	0.6	1	6.6
	Песчаные породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	1	5	0.8	1	6.8
	Глинистые породы, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами (с температурами, близкими к 0 °C)	1	5	0.9	1	6.9
	Песчаные породы	1	5	1	1	7
	Глинистые породы	0	5	2	0	7
	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием глинистых пород	0	5	2	0	7
	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием песчаных пород	1	5	1.4	1	7.4
	Глинистые породы мощностью 1–5 м, перекрывающие песчаные	1	5	1.4	1	7.4
	Песчаные породы мощностью 3–5 м, перекрывающие глинистые	1	5	1.5	1	7.5
	Глинистые породы	1	5	2	1	8
	Переслаивающиеся песчано-глинистые толщи с преобладанием глинистых пород	1	5	2	1	8
	Торфяные породы	0	5	4	0	9
	Торфяные породы	1	5	4	1	10

\* Чем больше величина балла, тем медленнее протаивает верхняя 10-метровая часть толщи. Баллы: за счет льдистости ( $B_A$ ), за счет геологического строения ( $B_B$ ), за счет наличия торфяного покрова ( $B_B$ ).

\*\* Нуль – отсутствует торфяной покров, единица – наличие торфяного покрова.

Таблица 3. Характерные значения балльной оценки инерционности протаивания пород верхней 10-метровой части толщи для основных районов юга западно-сибирской криолитозоны

Географическое положение (район)	$B_A$	$B_B$	$B_B$	$B_G$	Суммарный $B_{ABG}$	Инерционность многолетнего оттаивания
Верховья р. Надым	5	1.5	1	2.5	10	Высокая
Бассейн р. Таз	3	1.4	1	2.5	7.9	Средняя
Пур-Надымское междуречье	1	1.4	0	2.5	4.9	Низкая

среднегодовой температуры воздуха для периода 1961–2005 гг. По мнению авторов, результаты их исследования могут быть использованы “при ретроспективных оценках эволюции состояния криолитозоны и прогнозе ее изменений в XXI веке” [Павлов, Малкова, 2009, с. 32].

Динамическая картографическая модель (см. рис. 5) среднегодовой температуры ММП также учитывает неодинакость отклика криолитозоны на изменение климата в зависимости от зонального положения территории [Бердников и др., 2022].

#### Карта нового положения южной границы криолитозоны

Единичные уникальные острова не учитываются в рамках исследования геофизической южной границы криолитозоны.

Анализ карты вероятного нового положения геофизической южной границы криолитозоны в

Западной Сибири показывает большую пространственную неоднородность прогнозируемых изменений (см. рис. 4). Это связано с тем, что для разных районов наиболее типичны конкретные соотношения льдистости, литологического состава пород и строения разреза, наличия торфяного покрова и степени близости среднегодовой температуры пород к 0 °C (см. табл. 3). Так, для верховий р. Надым и Пур-Надымского междуречья наиболее характерны высокие значения льдистости ММП и сильно развитый торфяной покров. В данных районах прогнозируется преимущественно низкая интенсивность оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи (см. рис. 2, табл. 3). Здесь южная граница криолитозоны существенно не отступает на север (см. рис. 4). Кроме того, на карте хорошо прослеживается, что в данном районе для значительной части участков характерна температура ниже –1 °C (см. рис. 2). Для таких

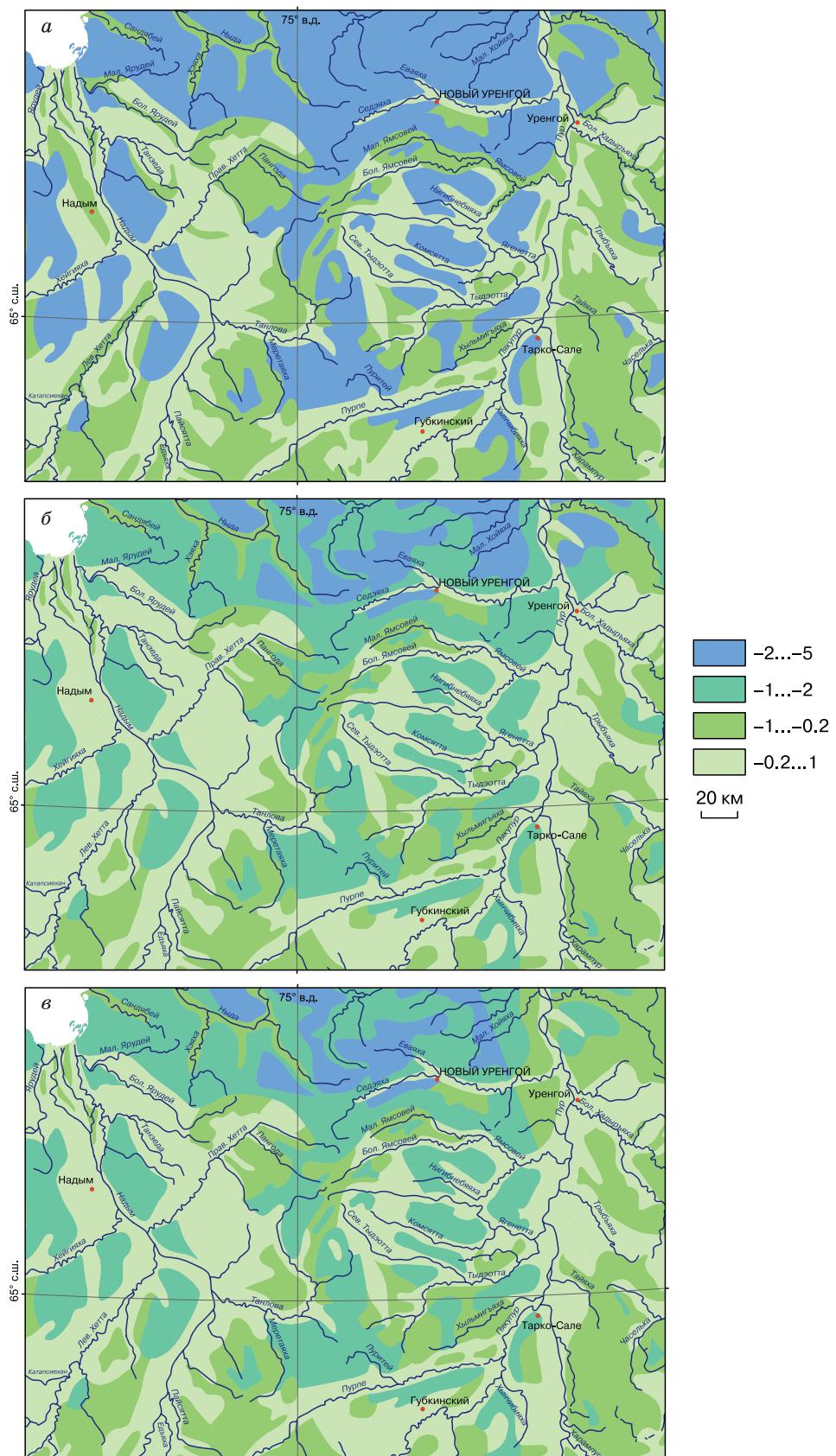


Рис. 5. Динамическая карта среднегодовой температуры ММП Пур-Надымского междуречья в период 1986–2045 гг.

а – 1986 г.; б – 2023 г.; в – 2045 г.

участков оттаивание пород верхней 10-метровой части толщи в ближайшем будущем (к 2050 г.) не ожидается (см. табл. 2).

При этом на таких же широтах в бассейне р. Таз почти на всех участках среднегодовая температура пород выше  $-1^{\circ}\text{C}$ , а значения льдистости в данном районе меньше, чем на Пур-Надымском междуречье и в верховьях р. Надым. В связи с этим в бассейне р. Таз преобладает средняя прогнозируемая интенсивность оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи (см. рис. 2, табл. 3), и геофизическая граница криолитозоны, вероятно, существенно сместится на север (см. рис. 4).

Участки с высокой прогнозируемой интенсивностью многолетнего оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи распространены в Западной Сибири относительно мозаично. Плотность их пространственного распределения возрастает лишь на левобережье р. Енисей. В данном районе также велика роль участков с низкой прогнозируемой интенсивностью оттаивания (см. рис. 2), поэтому значительного отступания на север южной геофизической границы криолитозоны не ожидается (см. рис. 4).

Существующие посты мониторинга ИКЗ ТюМНЦ СО РАН в будущем позволят сформулировать подходы для проверки построенной карты (см. рис. 4).

## ВЫВОДЫ

1. Получена картографическая модель вероятного нового положения южной границы криолитозоны в Западной Сибири к 2050 г.

2. Ожидаемое отступание на север южной границы криолитозоны будет носить неравномерный характер в зависимости от местных условий, связанных с криолитогенной основой ландшафта.

3. Максимальное отступание южной границы криолитозоны предположительно произойдет в бассейне р. Таз (до 150 км). Такая ситуация ожидается в данном районе в связи с более широким, чем в верховьях р. Надым, распространением участков со среднегодовыми температурами ММП, максимально близкими к  $0^{\circ}\text{C}$  (выше  $-1^{\circ}\text{C}$ ), и меньшими значениями льдистости пород.

4. В верховьях р. Надым не произойдет существенного отступания к северу южной границы криолитозоны. Это связано с характерным для рассматриваемого района сочетанием высоких значений льдистости и сильно развитого торфяного покрова.

**Благодарности.** Автор благодарит д.г.-м.н. Д.С. Дроздова и к.г.н. Ю.Б. Баду за консультативную помощь.

Работа выполнена в Институте криосферы Земли ТюМНЦ СО РАН в рамках государственного

задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

## Литература

**Бердников Н.М., Малкова Г.В., Дроздов Д.С. и др.** Динамическая карта температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в период 1960–2100 годов // Сб. докл. Шестой конф. геокриологов России “Мониторинг в криолитозоне” (Москва, 14–17 июня 2022 г.) [электрон. изд. сетевого распространения]. М., КДУ, Добросвет, 2022, с. 515–519. – <https://bookonlime.ru/node/44945> (дата обращения: 02.05.2024).

**Васильчук Ю.К.** Современное положение южной границы зоны многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской низменности // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 17–27.

**Геокриологическая карта СССР:** масштаб 1:2 500 000. М., ГУГК, 1991 (отпечатано 1996), 16 л.

**Геокриологический словарь** / Под ред. В.В. Баулина, В.Э. Мурзаевой. М., ГЕОС, 2003, 140 с.

**Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Романовский В.Е. и др.** Цифровые карты криолитозоны и оценка современных тенденций изменений в криосфере // Материалы XI Междунар. симпоз. по проблемам инж. мерзлотоведения: тез. докл. (Магадан, 5–8 сент. 2017 г.). Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2017, с. 233–234.

**Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н.** Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 22–31.

**Карта** генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. Масштаб 1:1 000 000 / авт. Г.В. Ананьева, Ю.Б. Баду, Ю.К. Васильчук и др. М., Картфабрика Центргеологии, 1991.

**МГЭИК**, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправит. группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов, Р.К. Пачаури, Л.А. Мейер (ред.)]. Женева, Швейцария, МГЭИК, 163 с.

**Общее мерзлотоведение** (геокриология): 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1978, 464 с.

**Объяснительная записка** к Геокриологической карте СССР масштаба 1:2 500 000. М., Мин-во геологии СССР, ПГО “Гидроспецгеология”, 1991, 125 с.

**Павлов А.В., Малкова Г.В.** Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 32–39.

## References

Berdnikov N.M., Malkova G.V., Druzov D.S. et al. Dynamic temperature map of permafrost of Western Siberia in the period 1960–2100 years. In: Collection of Repost of the Sixth Conf. of Geocryologists of Russia “Monitoring in cryolithozone” (Moscow, 14–17 June 2022) [Electronic publication of online distribution]. Moscow, KDU, Dobrosvet, 2022, p. 515–519. – <https://bookonlime.ru/node/44945> (last visited: 02.05.2024). Vasil'chuk Yu.K. Modern southern limit of permafrost in Western Siberia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 1, p. 17–27 (in Russian).

Geokriologicheskaya karta SSSR [Geocryological map of the USSR], scale 1:2 500 000. Moscow, GUGK, 1991 (printed 1996), 16 sheets.

Geokriologicheskii slovar' [Geocryological dictionary]. V.V. Baulin, V.E. Murzaeva (eds.). Moscow, GEOS, 2003, 140 p.

Drozdov D.S., Malkova G.V., Romanovsky V.Ye. et al. Digital maps of the cryolithozone and assessment of current trends in changes in the cryosphere. In: Proc. of the Int. Sympos. on Permafrost Engineering (Magadan, 5–8 Sept. 2017). Yakutsk, IMZ SO RAN, 2017, p. 233–234 (in Russian).

Drozdov D.S., Ukrantzeva N.G., Tzarev A.M., Chekrygina S.N. Changes of permafrost temperature field and geosystem state on the Urengoy oil-gas-field territory during the last 35 years (1974–2008). Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2010, vol. XIV, No. 1, p. 22–31 (in Russian).

Map of genetic types and iciness top ten-meter section of permafrost rocks of the West Siberian plate, scale 1:1 000 000.

G.V. Ananyeva, Yu.B. Badu, Yu.K. Vasil'chuk et al. Moscow, Cartographic factory of the Cenozoic, 1991.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [core writing team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland, IPCC, 163 p. (in Russian).

General permafrost study (Geocryology): edition 2, revised and updated. V.A. Kudryavtsev (ed.). Moscow, Moscow Univ. Press, 1978, 464 p. (in Russian).

Explanatory note to Geocryological map of the USSR, scale 1:2 500 000. Moscow, Ministry of Geology SSSR, PGO "Gidrospetsgeologiya", 1991, 125 p. (in Russian).

Pavlov A.V., Malkova G.V. Small-scale mapping of trends of the contemporary ground temperature changes in the Russian North. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 4, p. 32–39 (in Russian).

Поступила в редакцию 5 марта 2024 г.,  
после доработки – 17 июня 2024 г.,  
принята к публикации 24 июня 2024 г.