

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 551.345; 528.8; 621.644

DOI: 10.15372/KZ20230106

МЕТОДИКА РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ
ПРОТЯЖЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ
ПО УСЛОВИЯМ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОКАРСТАЕ.М. Макарычева¹, В.П. Мерзляков², **О.К. Миронов²**

¹ Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО “НИИ Транснефть”), центр мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта, лаборатория геотехнических обследований, 117186, Москва, Севастопольский просп., 47а, Россия; MakarychevaEM@niitnn.transneft.ru

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, лаборатория геокриологии, 101100, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия; sryo2@yandex.ru

Определены причины неоднородности распространения термокарста вдоль протяженных линейных объектов с применением вероятностно-статистического метода. Приведен перечень природных условий, влияющих на распространение термокарстовых явлений вдоль нефтепровода. Обоснована и разработана методика районирования буферной зоны протяженных линейных объектов (на примере магистрального нефтепровода) по условиям формирования явлений. Построены карты районирования буферной зоны магистрального нефтепровода по условиям, способствующим или препятствующим формированию термокарста.

Ключевые слова: термокарст, магистральный трубопровод, районирование, “большие данные”, вероятность, статистика.

METHODOLOGY FOR ZONING THE TERRITORY OF LONG-DISTANCE LINEAR OBJECTS ACCORDING TO THERMOKARST FORMATION CONDITIONS

Е.М. Makarycheva¹, V.P. Merzlyakov², **O.K. Mironov²**

¹ Pipeline Transport Institute LLC (Transneft R&D, LLC),

Sevastopolskiy prosp. 47a, Moscow, 117186, Russia; MakarychevaEM@niitnn.transneft.ru

² Sergeev Institute of Environmental Geoscience, RAS, Ulanskiy per. 13, bld. 2, Moscow, 101000, Russia

The probabilistic-statistical method is applied to study the causes of the thermokarst distribution heterogeneity along the long linear constructions. A list of natural conditions affecting the development of thermokarst along an oil pipeline is discussed. The methodology for zoning buffer area of long-distance linear constructions (e.g., oil pipeline) according to the conditions of thermokarst development is substantiated. We have delineated thermokarst-susceptible and thermokarst-tolerant areas along the oil pipeline buffer zone according to the environmental conditions.

Keywords: thermokarst, trunk pipeline, zoning, “big data”, probability, statistics.

ВВЕДЕНИЕ

Под термокарстовыми явлениями понимают формы рельефа (некоторый временной срез процесса или его конечный результат), возникшие в результате таяния залеже- или текстурообразующего подземного льда, уплотнения оттаявшего грунта и его деформации независимо от масштаба процесса [Шур, 1988]. В работе рассматриваются как реликтовые и древние термокарстовые образования, так и современные.

На всех этапах жизненного цикла магистральных нефтепроводов происходит постоянное накопление “больших данных” об объекте и территории его расположения. В условиях спе-

цифики объектов большой протяженности невозможно обеспечить равную пространственно-временную детальность информации, возникает проблема интерполяции и экстраполяции данных.

Построение расчетных моделей, описывающих состояние системы “трубопровод – окружающая среда”, имеет следующие особенности [Радионова и др., 2016]:

– большой перечень требуемых исходных данных;

– необходимость построения гипотез изменения во времени исходных данных;

– несоответствие доступного пространственного шага определения параметров окружающей среды и фактической их изменчивости;

– невозможность сопоставления разномасштабных данных.

Накопление временных рядов “больших данных” и невозможность обеспечить равную пространственно-временную детальность информации о природных условиях прохождения линейных объектов требует поиска новых средств обработки и анализа информации, а также формирования основы для рационального планирования геологических работ с учетом требований необходимости и достаточности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования являлась разработка и обоснование методики районирования территории протяженных линейных объектов по условиям формирования термокарста. В качестве объекта исследования была выбрана буферная зона магистрального нефтепровода Восточная Сибирь–Тихий океан-1 (ВСТО-1). Выбранный нефтепровод самый протяженный в зоне распространения многолетнемерзлых пород России (рис. 1).

Буферная зона магистрального нефтепровода ВСТО-1 – полоса трассы шириной 3 км (по 1,5 км

от оси нефтепровода), протяженностью 2085 км (в зоне распространения многолетнемерзлых пород).

Ширина буферной зоны нефтепровода ВСТО-1 позволила провести анализ явлений как в зоне влияния нефтепровода, так и в ненарушенных условиях. На всем протяжении трассы применена подземная прокладка нефтепровода, что позволяет считать техногенное влияние на участки условно одинаковым.

В ходе исследования было выполнено дешифрирование явлений термокарста в буферной зоне магистрального нефтепровода; определены причинно-следственные связи неравномерности распространения термокарста по территории исследования; проведено районирование буферной зоны магистрального нефтепровода по условиям формирования термокарста [Макарычева, 2018].

Исходными данными для дешифрирования явлений послужили разномасштабные топографические карты, космоснимки и аэрофотоснимки высокого разрешения (0,19 м/пиксел), результаты трехлетнего цикла аэровизуальных и наземных обследований ФГБУН Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН) и ООО “ЦИЭКС”, выполненных в период с 2010 по 2012 г., а также результаты инженерно-геологических изысканий и фондовые данные.



Рис. 1. Схема магистральных нефтепроводов, расположенных в сложных природно-климатических условиях.

1 – магистральные нефтепроводы ПАО “Транснефть”; 2 – строящиеся и проектируемые нефтепроводы ПАО “Транснефть”; 3 – прочие магистральные нефтепроводы; 4 – магистральные нефтепродуктопроводы ПАО “Транснефть”; 5 – проектируемые магистральные нефтепродуктопроводы ПАО “Транснефть”; 6 – объекты геотехнического мониторинга ПАО “Транснефть”.

Термокарстовый генезис явлений подтвержден данными инженерно-геологических изысканий и такими дополнительными дешифровочными признаками, как отседания береговых блоков грунта (трещины, параллельные береговой линии, смена приглубых и отмелых участков подводной части вдоль берега). Дополнительным идентификационным признаком термокарста служила стабильная или положительная динамика обводненности явления в течение всего периода обследований, несмотря на климатические осцилляции. По результатам дешифрирования было выявлено и нанесено на карту 2146 термокарстовых форм.

Результаты дешифрирования участков компенсирующих мероприятий и ремонтных работ по аэровизуальным обследованиям за 2011–2012 гг. использовались для анализа влияния термокарста на эксплуатацию линейной части магистрального нефтепровода.

Для поиска причинно-следственных связей неравномерности распространения явлений термокарста по территории исследования был применен вероятностно-статистический метод. В качестве источников данных для расчетов приняты опубликованные карты обзорного масштаба [*Мерзлотные ландшафты...*, 1989; *Мерзлотно-ландшафтная карта...*, 1991; *Федоров, 1991; Гео-криологическая карта...*, 1996], а также тематические крупномасштабные карты территории вдоль трассы нефтепровода, составленные ИГЭ РАН в 2010 г.: карта природных комплексов (м-ба 1:50 000) и карта морфоструктурного районирования (м-ба 1:100 000), а также фондовые данные и литературные источники [*Якутия, 1965; Южная Якутия, 1975; Тыртыков, 1976; Оспенников и др., 1980*].

Тематические карты содержат несколько характеристик исследуемой территории. Карта природных комплексов, например, содержит информацию о типах местности, растительности, рельефе, заболоченности участков трассы нефтепровода. Под типами местности понимаются таксономические единицы ландшафта, выделенные по однородности рельефа и зональным типам растительности.

Согласно карте морфоструктурного районирования, на территории выделены донеотектонические (древние) региональные структуры и неотектонические структуры второго порядка (свод, прогиб и поднятие).

Неотектонические структуры второго порядка выделяются по направленности (вертикальной и горизонтальной), интенсивности движений и особенностям их выражения в рельефе. Свод формируется преимущественно в результате вертикальных движений (напряжений) и в меньшей степени за счет субгоризонтальных движений. При этом он является относительно стабильной

структурной формой, выраженной в виде овального и изометричного поднятия. В пределах платформ в рельефе свод может быть выражен в виде полого выпуклого плато (сводообразное плато) с хорошо проявленной лестницей геоморфологических поверхностей.

Поднятия и прогибы формируются в результате преимущественно субгоризонтальных движений (напряжений) и являются более интенсивно развивающимися формами по сравнению со сводами. Они имеют протяженный и линейный тип развития. Как правило, поднятия и прогибы являются сопряженными формами и характеризуются зональным развитием, связанным с высокоактивными тектоническими областями.

Независимость критериев при построении карт природных условий территории позволяет использовать данный метод для поиска связей распространения термокарста с различными географо-геологическими условиями в коридоре трассы нефтепровода, а также повышает достоверность данного эксперимента.

Анализ влияния природных условий территории на распространение термокарста выполнялся в ходе серии независимых экспериментов. Совместно рассмотрены встречаемость термокарста и встречаемость природных и техногенных условий вдоль магистрального нефтепровода.

Были проведены серии независимых испытаний, каждая из которых состояла в следующем. Выбиралась характеристика территории, влияние которой на распространение термокарста нас интересует, например, ландшафтное деление территории по типам местности. Определялся набор типов местности на исследуемой территории. В рассматриваемом случае имеется четыре типа местности: 1) интразональные ландшафты (террасовые комплексы речных долин, прирусловые поймы, долины малых рек и переувлажненные ложбины, болота верховые и переходные, участки, пройденные низовым пожаром); 2) лесные; 3) лесотундровые, преимущественно равнинные (плоскогорья); 4) лесотундровые, преимущественно горные. Последовательно просматривались погонные километры трассы, в соответствующую ячейку заносились данные о том, какие типы местности встречались на конкретном километре. Если в местности какого-либо типа встречалось хотя бы одно термокарстовое явление, этот факт отмечался дополнительно. Полученные данные оформлялись в виде таблицы. Строки таблицы соответствуют единичным участкам, столбцы – типам местности. Вся информация в таблице представлялась в троичной системе: 0 – нет данного типа местности на участке, 1 – есть данный тип местности на участке, 2 – есть данный тип местности на участке и есть термокарст в местности данного типа.

Следующим этапом было вычисление частоты встречаемости по каждому типу местности. Для этого определялось количество единичных участков трассы, содержащих местность данного типа, и количество в них участков, содержащих термокарст. Указанные операции осуществлялись стандартными средствами ГИС при помощи функции запросов, позволяющей выбрать по столбцам таблицы все ячейки со значением 1 и 2 при подсчете встречаемости типов местности или 2 при подсчете встречаемости термокарста.

Обработка статистических данных выполнялась в программном комплексе MapInfo по специальному алгоритму, позволяющему повысить достоверность результатов и сократить трудоемкость работ при анализе данных [Макарычева и др., 2018].

Таким образом, подготовлен материал для статистической обработки: известны встречаемости данного типа местности N_k (число километровых участков, содержащих местность данного типа), общая встречаемость всех типов местности $N = \sum_{k=1}^4 N_k$, частоты появления термокарста, обнаруженные в местности данного типа, n_k (число километровых участков, содержащих данный тип местности с термокарстом), общее число всех исходов опыта $n = \sum_{k=1}^4 n_k$. Здесь $k = 1, 2, 3, 4$ – номер типа местности.

В целях дальнейшей статистической обработки предполагалось: 1) наличие или отсутствие термокарста в данном типе местности (в данных природных или техногенных условиях) есть *случайное событие* (исход опыта); 2) термокарстовые явления имеют *равномерное* распределение вероятностей по всем типам местности, чем чаще встречается данный тип местности, тем больше вероятность встретить в нем термокарст.

Эти предположения и вышеуказанный способ определения встречаемости при весьма малой длине участка в сравнении с общей протяженностью объекта позволяют для расчета вероятности p_k встречи термокарста в местности k -го типа принять формулу $p_k = N_k/N$. Если это так, то указанным предположениям удовлетворяют случайные события, частоты появления которых имеют полиномиальное распределение вероятностей [Математический... словарь, 1988].

Ниже проверяется гипотеза о том, что полученные в опыте частоты появления термокарста, обнаруженные в местности данного типа, n_1, n_2, n_3, n_4 , имеют полиномиальное распределение.

Для проверки этой гипотезы рекомендуют использовать критерий согласия Пирсона [Математический... словарь, 1988]. Однако этот критерий в

случае несогласия отвергает гипотезу в целом, по всем индексам k , если появление исходов n_k хотя бы в одном типе местности является *неслучайным*. Авторы же интересуют, какие из r возможных исходов являются *случайными*, а какие *неслучайными* (подверженными систематическим воздействиям условий, наличием связей). С помощью критерия Пирсона получить ответ на этот вопрос нельзя.

Полиномиальное распределение имеет важное свойство: каждая из r случайных величин n_k имеет биномиальное распределение вероятностей. Это позволяет рассматривать вместо одного полиномиального распределения систему k различных биномиальных распределений с математическими ожиданиями $M_k = np_k$ (теоретическими частотами), дисперсиями $D_k = np_k(1 - p_k)$ и средними квадратичными отклонениями $\sigma_k = \sqrt{np_k(1 - p_k)}$, где $n = \sum_{k=1}^r n_k$ – общая встречаемость термокарста по всем типам местности.

С помощью этих формул можно получить числовые характеристики, позволяющие выделить результаты эксперимента, не являющиеся случайными [Макарычева и др., 2018]. Для этого было использовано известное в математической статистике “правило 3σ ” [Ивашов-Мусатов, 2003] совместно для каждого типа местности. Вычисляя M_k, σ_k и проводя сравнение, получим согласие с нашей гипотезой, если n_k попадает внутрь интервала

$$[M_k - 3\sigma_k; M_k + 3\sigma_k]. \quad (1)$$

В этом случае n_k является значением случайной величины, подчиняющейся указанному закону распределения. В противном случае гипотеза отвергается, из чего следует, что данный тип местности систематически воздействует на величину n_k .

Если $n_k > M_k + 3\sigma_k$ (экспериментальная частота больше правой границы интервала), то местность k -го типа способствует формированию термокарста:

$$\delta \uparrow = n_k - (M_k + 3\sigma_k). \quad (2)$$

В случае $n_k < M_k - 3\sigma_k$ (экспериментальная частота меньше левой границы интервала) условие препятствует формированию термокарста:

$$\delta \downarrow = (M_k - 3\sigma_k) - n_k. \quad (3)$$

Величины (2) и (3) можно назвать количественными характеристиками связей прямого и обратного типов. Они выражаются числами, показывающими превышение правой границы интервала (1) экспериментальной частотой и добавку к экспериментальной частоте до левой границы соответственно.

Таблица 1.

Результаты анализа влияния типов местности на распространение термокарста в буферной зоне нефтепровода

Числовая характеристика	Тип местности			
	Интразональные	Лесные	Лесотундровые, преимущественно равнинные (поскогорья)	Лесотундровые, преимущественно горные
Номер типа местности (k)	1	2	3	4
Общая встречаемость термокарста в пределах всех типов местности (n)	388	388	388	388
Обнаруженная встречаемость термокарста в пределах одного типа местности (n_k)	216	158	4	10
Нижняя граница достоверности ($M_k - 3\sigma_k$)	105.28	174.86	-2.14	29.28
Верхняя граница достоверности ($M_k + 3\sigma_k$)	161.41	233.87	4.95	68.50
Характеристика связи прямого типа $\delta_k \uparrow$	54.6	–	–	–
Характеристика связи обратного типа $\delta_k \downarrow$	–	16.86	–	19.28
Тип связи	Прямой	Обратный	Нет связи	Обратный

В табл. 1 представлены результаты вероятностно-статистического анализа связи распространения термокарста и типов местности в буферной зоне нефтепровода.

Встречаемости типов местности имели следующие значения: $N_1 = 1331$, $N_2 = 2040$, $N_3 = 14$, $N_4 = 488$, $N = 3873$.

Районирование буферной зоны магистрального нефтепровода по условиям, способствующим или препятствующим формированию явлений термокарста, было выполнено на основе зависимостей, полученных в результате вероятностно-статистического анализа. Все условия и факторы были разделены на две группы: способствующие формированию термокарста и препятствующие его формированию. Способствующими формированию названы те условия, с которыми была обнаружена прямая связь встречаемости термокарстовых явлений, препятствующими – условия с обратной связью. Наложение ареалов распространения по условиям, способствующим и препятствующим формированию термокарста, позволило построить две отдельные карты районирования.

АНАЛИЗ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕРМОКАРСТА

Анализ был выполнен как по всей трассе нефтепровода, так и в пределах каждой из трех древних тектонических структур в отдельности.

Термокарстовые явления распространены относительно древних тектонических структур неравномерно, однако ни прямой, ни обратной связи с конкретной тектонической структурой выявлено не было. В то же время региональные древние структуры определяют вещественно-структурные неоднородности территории, что косвенно, но влияет на закономерности распространения термокарста.

Трасса нефтепровода пересекает три древние тектонические структуры: осадочный чехол Сибирской платформы (в том числе Среднесибирское плоскогорье), Алдано-Становой щит Сибирской платформы и Монголо-Охотскую складчатую систему. Были выявлены изменения связей распространения термокарста с ландшафтными условиями (тип местности, растительность, рельеф) и морфоструктурами второго порядка (свод, поднятие, прогиб) при переходе от одной тектонической структуры к другой. Также были определены количественные характеристики связей и их направленность (прямая, обратная, нет связи), выделены условия, влияющие на формирование термокарста.

В табл. 2 представлена выборка природных условий, имеющих прямую связь с распространением термокарста, полученная по результатам статистической обработки данных для каждой из трех древних тектонических структур. При переходе от одной тектонической структуры к другой отмечается изменение как типов связи, так и их количественных характеристик.

В пределах осадочного чехла Сибирской платформы была статистически доказана связь распространения термокарста с зонами поднятий. Полученная связь является дискуссионной, однако влияние морфоструктур второго порядка, отвечающих за направленность и интенсивность неотектонических движений, часто может проявляться не напрямую, а через другие факторы, в том числе через весь комплекс ландшафтных условий.

Можно также предположить, что денудационные процессы в областях поднятий привели к смещению подошвы сезонного слоя в глубину разреза пород и достижению ею льдистых горизонтов, которые при оттаивании способны формировать термокарстовые понижения. Трасса нефтепровода на территории южной части Сред-

Таблица 2. **Количественная оценка природных условий, имеющих прямую связь с распространением термокарста, в пределах древних тектонических структур**

Природные условия	Плита (осадочный чехол)	Алдано-Становой щит	Монголо-Охотская складчатая система
Направленность неотектонических движений			
Свод	Обратный тип связи	1.00*	Нет связи
Поднятия	36.50	Нет связи	Нет связи
Тип местности			
Интразональные ландшафты	29.29	14.11	Нет связи
Лесотундровые, преимущественно равнинные (плоскогорья)	Нет связи	Нет связи	0.28
Рельеф			
Возвышенные платообразные и ступенчато-платообразные среднерасчлененные поверхности	Нет связи	3.18	Нет связи
Области низких долинных и межгорных впадин	8.69	Нет связи	Нет связи
Области слабовозвышенного увалистого рельефа	1.49	Нет связи	Нет связи
Средневозвышенные платообразные и ступенчато-платообразные среднерасчлененные поверхности	48.27	Нет связи	Нет связи
Растительность			
Болота верховые и переходные	Нет связи	0.93	Нет связи
Болота низинные и переходные с лугово-болотными сообществами	Нет связи	7.09	Нет связи
Лугово-кустарниковые сообщества с отдельными мелколиственными деревьями	9.35	Нет связи	Нет связи
Гарь с группами лиственницы, реже сосны с выжженным наземным покровом	2.40	Нет связи	Нет связи
Ерниковые и ивняковые сообщества, местами с единичными низкорослыми лиственницей, сосной и березой, с сухостоем на вырубках и гарях, частично заболоченные	Нет связи	Нет связи	1.24
Ерниковые кустарничково-зеленомошные сообщества с единичными лиственницей, сосной и березой	23.85	Нет связи	Нет связи
Кустарниковые, ерниковые кочкарные сообщества, местами с единичной низкорослой лиственницей и березой, часто заболоченные	8.37	6.80	Нет связи
Лиственничники редкостойные с пятнами каменистого грунта	7.68	Нет связи	Нет связи
Лиственнично-березовые и березовые леса	8.45	Нет связи	Нет связи
Лишенные растительности участки на территориях дражных переработок	Нет связи	Нет связи	0.52
Сосново-елово-пихтовые леса	12.82	Нет связи	Нет связи
Сосновые и березовые леса с отдельными заболоченными участками	8.06	Нет связи	Нет связи

* Все представленные числа – количественные характеристики связей прямого типа: $\delta_k \uparrow = n_k - (M_k + 3\sigma_k)$.

несибирского плоскогорья характеризуется распространением заглубленных многолетнемерзлых пород (ММП), в том числе сильнольдистых, а также с повторно-жильными льдами.

В зоне прерывистого распространения ММП на территории Среднесибирского плоскогорья явления приурочены к участкам с интразональными ландшафтами, что связано с широким распространением дисперсных супесчано-суглинистых и биогенных отложений с высокой льдистостью в пределах последних (рис. 2).

Дополнительно в пределах Сибирской платформы была выявлена связь между участками распространения гарей (пожаров) и термокарстом. Нарушение растительного покрова в результате пожаров создает условия для неравномерного протаивания торфа, образуются понижения, за-

полняющиеся водой. Под этими водоемами начинается просадка поверхности. Мелкие озера образуются, если торфяники подстилаются слабольдистыми непросадочными ММП.

На участке Алданского щита Сибирской платформы распространение термокарста большей частью приурочено к зоне сводов. Незначительные перепады рельефа, представленные возвышенными платообразными и ступенчато-платообразными среднерасчлененными поверхностями, создают ограниченные условия для дренажа поверхностных вод. Современная тектоническая активность в приповерхностной зоне протекает в условиях растяжения (трасса пересекает эти структуры поперек их простирания), что является причиной наличия большого числа приподнятых речных террас. В пределах Алданского щита ши-



Рис. 2. Фрагмент карты районирования буферной зоны магистрального нефтепровода по условиям, способствующим формированию термокарста на участке пересечения с р. Большая Черепаниха:

1 – зона пересечения трех III природных условий, способствующих распространению термокарста, 2 – двух II природных условий, 3 – одного I природного условия; 4 – водотоки; 5 – явления термокарста; 6 – участок наземных геологических обследований.

роко распространены низинные и переходные болота, а также заболоченные территории, промерзание и последующее протаивание которых способствует распространению термокарста.

На участке пересечения трассой нефтепровода Монголо-Охотской складчатой системы неотектонические движения отличаются высокой интенсивностью. Зоны поднятий и прогибов характеризуются большими перепадами высот. На этом участке не было обнаружено связи между термокарстом и неотектоническими структурами. В то же время выявлена связь распространения явлений термокарста с частично заболоченными участками вырубок и гарей по плоскогорьям, занятым ерниковыми и ивняковыми сообществами. Морфологические характеристики отдельных явлений (изрезанная прямолинейными отрезками форма берега с прямыми углами, выделение сетчатых структур или блоков на аэрофото- и космоснимках) указывают на распространение ПЖЛ.

РАЙОНИРОВАНИЕ БУФЕРНОЙ ЗОНЫ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА ПО УСЛОВИЯМ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОКАРСТА

Полученные зависимости легли в основу районирования территории. Все условия и факторы были разделены на две группы: препятствующие формированию термокарстовых явлений и способствующие их формированию.

По результатам работы составлены карты районирования трехкилометровой буферной зоны магистрального нефтепровода (м-ба 1:50 000) на

протяжении 2085 км (см. рис. 2). Карты способствуют обоснованному выбору и оптимизации размещения пунктов наблюдательной сети мониторинга.

Участок наземных геологических обследований расположен в зоне прерывистого распространения ММП, согласно результатам районирования, характеризуется тремя природными условиями местности, способствующими распространению термокарста: средневозвышенной платообразной и ступенчато-платообразной среднерасчлененной поверхностью; интразональным типом местности; лиственнично-березовыми и березовыми лесами. В полосе землеотвода нефтепровода (шириной 50 м) на данном участке определены явления техногенного термокарста, связанные с тепловым воздействием подземного нефтепровода в период его эксплуатации.

За пределами землеотвода в трехкилометровой зоне выявлены вытянутые озера и западины, берега которых имеют изрезанную прямолинейными отрезками форму с прямыми углами.

По данным наземных обследований (инженерно-геологический разрез в шурфе), участок сложен слабодистыми и льдистыми суглинками слоистой криотекстуры, кроме того, вскрыта залежь льда мощностью более 4 м.

Температура грунтов в скважине у трубопровода выше ($-1.5...-2$ °C), чем в скважине за пределами землеотвода (-3 °C). Данные инструментальных измерений в шурфе показали развитие ореола оттаивания вокруг нефтепровода (до 1.2 м под трубной секцией) [Novikov et al., 2015].

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика районирования территории протяженных линейных объектов по условиям формирования термокарста на основе вероятностно-статистического метода.

2. Методика дает возможность оперативного анализа больших массивов данных, а также позволяет реализовать алгоритмы автоматизированного анализа природных условий территории и построения карт районирования протяженных линейных объектов.

3. Вероятностно-статистический метод может быть использован для поиска зависимости распространения термокарста от геолого-географических условий на стадии проектирования и эксплуатации линейных объектов, в том числе на слабоизученных территориях.

Отличиями предложенной методики от применявшихся ранее являются: возможность определения, какие именно исходы опыта вызваны наличием зависимости распространения исследуемых явлений и условий, а какие являются случайными; наличие количественных критериев связи исследуемых явлений и влияющих на их распространение условий; возможность выделения условий как способствующих, так и препятствующих распространению явлений; возможность анализа как региональных, так и локальных взаимосвязей; возможность получения пространственных закономерностей при недостаточности исходных данных, их неравномерном пространственном распределении и разном масштабе.

Разработанная методика имеет универсальный характер, она может быть применена для анализа пространственных связей при обработке больших массивов данных, накопленных за период жизненного цикла протяженного линейного объекта.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122022400105-9.

Литература

Геокриологическая карта СССР м-ба 1:2 500 000 / Под ред. Э.Д. Ершова. Винница, Винницкая картогр. ф-ка, 1996, 16 л.

Ивашов-Мусатов О.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М., ФИМА, 2003, 224 с.

Макарычева Е.М. Региональный анализ распространения термокарстовых явлений в окрестности магистральной нефтепроводной системы: Дис. канд. геол.-мин. наук. М., 2018, 256 с.

Макарычева Е.М., Мерзляков В.П., Миронов О.К., Бесперстова Н.А. Анализ распространения термокарстовых явлений вдоль протяженного линейного сооружения с помощью вероятностно-статистического метода // Докл. расширенного заседания Науч. совета по криологии Земли РАН "Актуальные проблемы геокриологии". М., Унив. книга, 2018, т. 2, с. 69–76.

Математический энциклопедический словарь / Под ред. Ю.В. Прохорова и др. М., Сов. энциклопедия, 1988, 846 с.

Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР. М-б 1:2 500 000 / Под ред. П.И. Мельникова. М., Изд-во Комитета геодезии и картографии СССР, 1991, 2 л.

Мерзлотные ландшафты Якутии / А.Н. Федоров, Т.А. Ботулу, С.П. Варламов. Пояснит. записка к Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР м-ба 1:2 500 000. Новосибирск, Изд-во ГУГК, 1989, 170 с.

Оспенников Е.Н., Труш Н.И., Чижов А.Б., Чижова Н.И. Экзогенные геологические процессы и явления (Южная Якутия). М., Изд-во Моск. ун-та, 1980, 226 с.

Радионова С.Г., Лисин Ю.В., Кузнецов Т.И. и др. Совершенствование методов и средств прогнозных расчетов ореолов оттаивания, просадки и величины напряженно-деформированного состояния трубопроводов, проложенных в многолетнемерзлых грунтах // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2016, № 1 (21), с. 39–43.

Тыртиков А.П. О термокарсте на севере Западной Сибири // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976, вып. 6, с. 145–155.

Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: Методика выделения и вопросы картографирования. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 1991, 140 с.

Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск, Наука, 1988, 213 с.

Южная Якутия. Мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, 444 с.

Якутия / Под общей ред. И.П. Герасимова. М., Наука, 1965, 467 с.

Novikov P., Makarycheva E., Larionov V. Model of permafrost thaw halo formation around a pipeline // Engineering Geology for Society and Territory. Switzerland, Springer, 2015, vol. 6, p. 405–408.

References

Geokriologicheskaya karta [Permafrost map] SSSR mashtaba 1:2 500 000. E.D. Ershov (Ed.). Vinnica, Vinnickaya kartogr. f-ka, 1996 (in Russian).

Ivashov-Musatov O.S. Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow, FIMA, 2003, 224 p. (in Russian).

Makarycheva E.M. Regionalnyi analiz rasprostraneniya termokarstovoykh yavlenij v okrestnosti magistralnoi nefteprovodnoi sistemy [Analysis of thermokarst phenomena distribution near the main oil pipeline system]: PhD in geology. Moscow, 2018, 256 p. (in Russian). – https://www.geoenv.ru/materials/disser/dissertation_makaricheva.pdf

Makarycheva E.M., Merzlyakov V.P., Mironov O.K., Besperstova N.A. Analysis of the spread of thermokarst phenomena along an extended linear structure using a probabilistic-statistical method. In: Proc. reports of the extended meeting of the Scientific Council on Earth Cryology of the Russian Academy of Sciences "Actual problems of geocryology". Moscow, Univ. kniga, 2018, vol. 2, p. 69–76 (in Russian).

Matematicheskij entsiklopedicheskij slovar [Mathematical encyclopedic dictionary]. Yu.V. Prokhorov et al. (Eds.). Moscow, Soviet Encyclopedia, 1988, 846 p. (in Russian).

Merzlotno-landshaftnaya karta Yakutskoj ASSR [Permafrost landscape map of the Yakutskaya ASSR]. Masshtab 1:2 500 000. P.I. Mel'nikov (Ed.). Moscow, Izd-vo Komitet geodezii i kartografii SSSR, 1991, 2 l. (in Russian).

Merzlotnye landshafty Yakutii [Permafrost landscapes of Yakutia] / A.N. Fedorov, T.A. Botulu, S.P. Varlamov. Poyasnitel'naya zapiska k Merzlotno-landshaftnoj karte Yakutskoj ASSR masshtaba 1:2 500 000. Novosibirsk, Izd-vo GUGK, 1989, 170 p. (in Russian).

Ospennikov E.N., Trush N.I., Chizhov A.B., Chizhova N.I. Ekzogennye geologicheskie protsessy i yavleniya (Yuzhnaya Yakutiya) [Exogenic Geological Processes and Phenomena (South Yakutia)]. Moscow, Moscow Univ. Press, 1980, 226 p. (in Russian).

Radionova S.G., Lisin Yu.V., Kuznetsov T.I. et al. Improvement of methods and means of forecast calculations of thawing halos, penetration and stress-strain state of pipelines laid in permafrost. Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nef'ti i nef'teproduktov [Science and technology: Oil and oil products pipeline transportation], 2016, No. 1 (21), p. 39–43 (in Russian).

Tyrtikov A.P. About thermokarst in the north of Western Siberia. In: Prirodnye usloviya Zapadnoj Sibiri [Natural conditions of Western Siberia]. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1976, iss. 6, p. 145–155 (in Russian).

Fedorov A.N. Merzlotnye landshafty Yakutii [Permafrost landscapes of Yakutia: Method of isolation and mapping issues]. Yakutsk, IMZ SB RAN, 1991, 140 p. (in Russian).

Shur Yu.L. Verkhnij gorizont tolschi merslykh porod i termokarst [Upper horizon of permafrost and thermokarst]. Novosibirsk, Nauka, 1988, 213 p. (in Russian).

South Yakutia. Permafrost-hydrogeological and engineering-geological conditions of the Aldan mining region. V.A. Kudryavtsev (Ed.). Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1975, 444 p. (in Russian).

Yakutia. I.P. Gerasimov (Ed.). Moscow, Nauka, 1965, 467 p. (in Russian).

Novikov P., Makarycheva E., Larionov V. Model of permafrost thaw halo formation around a pipeline. In: Engineering Geology for Society and Territory. Switzerland, Springer, 2015, vol. 6, p. 405–408.

*Поступила в редакцию 4 июня 2021 г.,
после доработки – 14 ноября 2022 г.,
принята к публикации 19 декабря 2022 г.*