

А.Н. БРАГИН

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
680000, Хабаровск, ул. Дикопольцева, 56, Россия, andrey.bragin.87@list.ru

ТЕРМОКАРСТОВЫЙ РЕЛЬЕФ РАВНИН НИЖНЕГО ПРИАМУРЬЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ХОЗЯЙСТВЕННУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Выполнена количественная оценка густоты термокарстовых озер в однотипных ландшафтно-геоморфологических условиях на равнинных территориях бассейна нижнего Амура и сопредельных районах на основе подсчета их количества при дешифрировании спутниковых снимков высокого разрешения ESRI ArcGis Imagery и данных о взаимосвязи изменения площади озер с характером распространения многолетнемерзлых пород. Выделены участки с относительно холодными континентальными условиями по западной окраине Нижнеамурской низменности, в которых отчетливо прослеживается широтная зональность распространения термокарстового процесса и связанных с ним форм рельефа. На участках с относительно теплым климатом в районе побережий Татарского пролива и Сахалинского залива в результате деградации многолетнемерзлых пород широкое распространение получили посткриогенные термокарстовые озера. Установлено, что динамика криогенных процессов в наиболее теплых климатических условиях региона связана с тенденцией к увеличению площадей многолетнемерзлых пород в направлении с востока на запад при возрастании континентальности климата от побережья Татарского пролива вглубь континента с учетом влияния на климат Охотского моря и природно-климатических условий Буреинского горного массива. Дана общая оценка геоэкологических условий и риска хозяйственного освоения равнинных территорий Нижнего Приамурья, рассмотрены перспективы использования равнин и низменностей для их дальнейшего освоения, возведения объектов производственной и промышленной инфраструктуры, в том числе для связи автодорожной инфраструктурой прибрежных поселков с удаленными от морского побережья разрабатываемыми и перспективными крупными месторождениями полезных ископаемых.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, термокарстовые озера, зональность распространения, деградация мерзлоты, криогенные и посткриогенные процессы, геоэкологические условия.

A.N. BRAGIN

Institute for Water and Ecological Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
680000, Khabarovsk, ul. Dikopol'tseva, 56, Russia, andrey.bragin.87@list.ru

THERMOKARST RELIEF OF THE FLAT AREAS IN THE LOWER AMUR BASIN, AND ITS INFLUENCE ON ECONOMIC ACTIVITY

A quantitative assessment is made of the density of thermokarst lakes in the same type of landscape-geomorphological conditions in the flat areas within the Lower Amur basin and adjacent areas, based on counting their number when interpreting high-resolution satellite images from ESRI ArcGis Imagery and data on the relationship between changes in the area of lakes and the nature of the distribution of permafrost. Areas of relatively cold continental conditions have been identified along the western edge of the Lower Amur Lowland, in which the latitudinal zonality of the distribution of the thermokarst process and associated landforms is clearly visible. In areas with a relatively warm climate in the area of the coasts of the Tatar Strait and Sakhalin Bay, as a result of the degradation of permafrost, post-cryogenic thermokarst lakes have become widespread. It has been established that the dynamics of cryogenic thermokarst processes in the warmest climatic conditions of the region under consideration is associated with a general tendency to increase the areas of permafrost in the direction from east to west with increasing continental climate from the coast of the Tatar Strait inland of the continent, taking into account the influence on the climate of the cold Sea of Okhotsk and natural climatic factors and natural conditions of the Bureya mountain range. A general assessment of geoecological conditions and the risk of economic development of the plain territories of the Lower Amur region is made as well as considering the prospects for the further use of plains and lowlands for their further development and construction of production and industrial infrastructure, including for connecting the road infrastructure of the settlements along the coast of the Sea of Okhotsk with large mineral deposits, both under development and promising, remote from the sea coast.

Keywords: permafrost, thermokarst lakes, zonality, permafrost degradation, cryogenic and post-cryogenic processes, geoecological conditions.

ВВЕДЕНИЕ

Богатый природно-ресурсный потенциал России, неравномерность хозяйственного освоения территорий, а также удаленность слабоосвоенных территорий от крупных центров социально-экономического развития (транспортных узлов, городских агломераций и т. д.) способствуют сохранению естественных природно-ландшафтных условий, благоприятных экологических, уникальных природных образований и памятников, редких представителей растительного и животного мира. Однако освоение новых территорий открывает перспективы для развития регионов, что повышает их социально-экономический уровень, приводит к экономическому росту и дальнейшему улучшению качества жизни населения.

Освоение новых территорий связано как с экономическими, так и с природно-климатическими, ландшафтными, геологическими и экологическими рисками и последствиями, которые необходимо исследовать. Поэтому нужно осуществлять мониторинг, прогнозировать их влияние на хозяйственную деятельность и инфраструктуру, а также разрабатывать рекомендации по хозяйственному использованию территории как на этапе планирования, так и в процессе освоения.

В настоящее время в южной геокриологической зоне Дальнего Востока России в результате глобального потепления наблюдается активный процесс трансформации окружающей природной среды — деградация многолетнемерзлых грунтов и связанные с ней изменения существующих ландшаф-

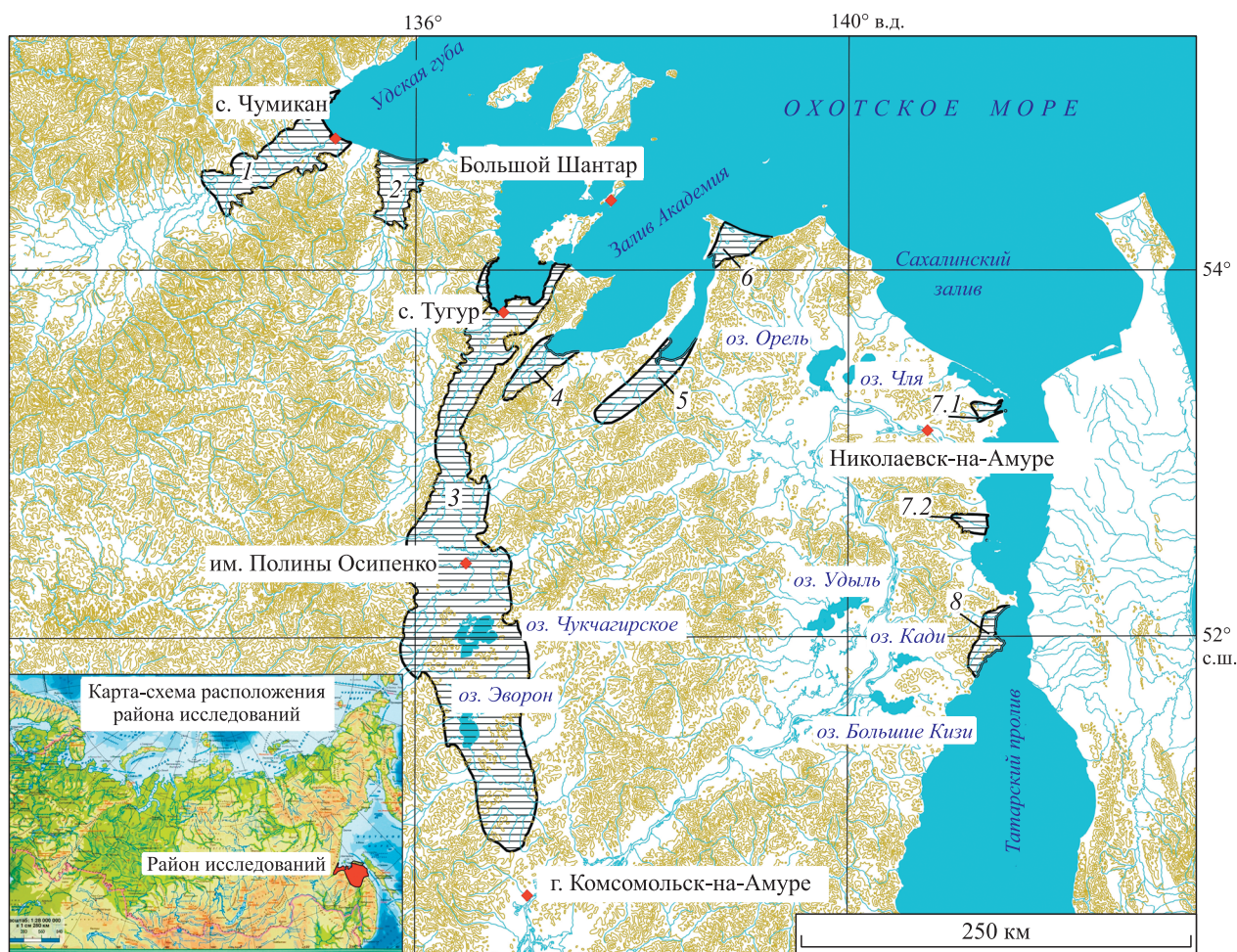


Рис. 1. Карта-схема расположения равнинных территорий Нижнего Приамурья и Южного Приохотья.

1 — Удская низменность; 2 — Торомская низменность; 3 — Тугур-Чукчагир-Эворонская низменность; 4 — побережье Ульбанского залива; 5 — побережье залива Николая; 6 — Мухтельская низменность; 7 — приморская низменность Амурского лимана; 7.1 — приустьевая часть р. Ныгай; 7.2 — междуречная долина рек Зеленая и Уарке; 8 — приморская низменность Татарского пролива.

тно-геоморфологических и инженерно-геологических условий, в особенности на равнинных участках и прибрежных низменностях.

Приуроченность рассматриваемой территории (рис. 1) к южной окраине распространения многолетнемерзлых грунтов, криогенные процессы и явления, исчезновение и трансформация криогенных ландшафтов, происходящие при доминирующем влиянии повышения среднегодовых температур воздуха [1–3], влияют на состояние криолитозоны бассейна нижнего Амура [4, 5], а также могут негативно сказаться как на осуществлении хозяйственной деятельности в настоящее время, так и при дальнейшем освоении перспективных участков территорий и логистических маршрутов к ним.

Цель исследования — оценить современное состояние многолетнемерзлых пород (ММП) равнин Нижнего Приамурья и Южного Приохотья, криогенных процессов и связанных с ними форм криогенного и посткриогенного рельефа, а также их влияние на современные и перспективные объекты промышленной, производственной и логистической инфраструктуры при освоении равнин и прилегающих территорий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка современного состояния криолитозоны Нижнего Приамурья и Южного Приохотья выполнена на основании актуализированных научных сведений о пространственном распространении ММП и его закономерностях, типах мерзлоты, характере и динамике за последние 30 лет [4–6]. В настоящей работе криогенные условия описаны на основе сравнительного анализа геокриологических карт и схем, составленных отечественными учеными [5, 6] и зарубежными исследователями с помощью модели состояния равновесия температуры верхней части вечной мерзлоты (ТТОР-модели) [4], которая показывает распределение типов ММП как на равнинах бассейна нижнего Амура, так и в пределах низкогорий Северного Сихотэ-Алиня и Северного Приамурья.

Для оценки дальнейшей динамики криолитозоны использованы статистические значения и построенные по ним графики распределения среднегодовой температуры воздуха за последние 50–70 лет по ключевым метеостанциям бассейна нижнего Амура (рис. 2, 3). С целью пространственного анализа трансформации ландшафтной структуры равнинных территорий бассейна нижнего Амура выполнена количественная оценка густоты термокарстовых озер криогенного и посткриогенного характера с помощью дешифрирования спутниковых снимков высокого разрешения ESRI ArcGis Imagery через подсчет коэффициента густоты (Кгв) как отношения количества водоемов в пределах однотипных ландшафтно-геоморфологических условий к площади самого района (рис. 4–6, таблица). Следует

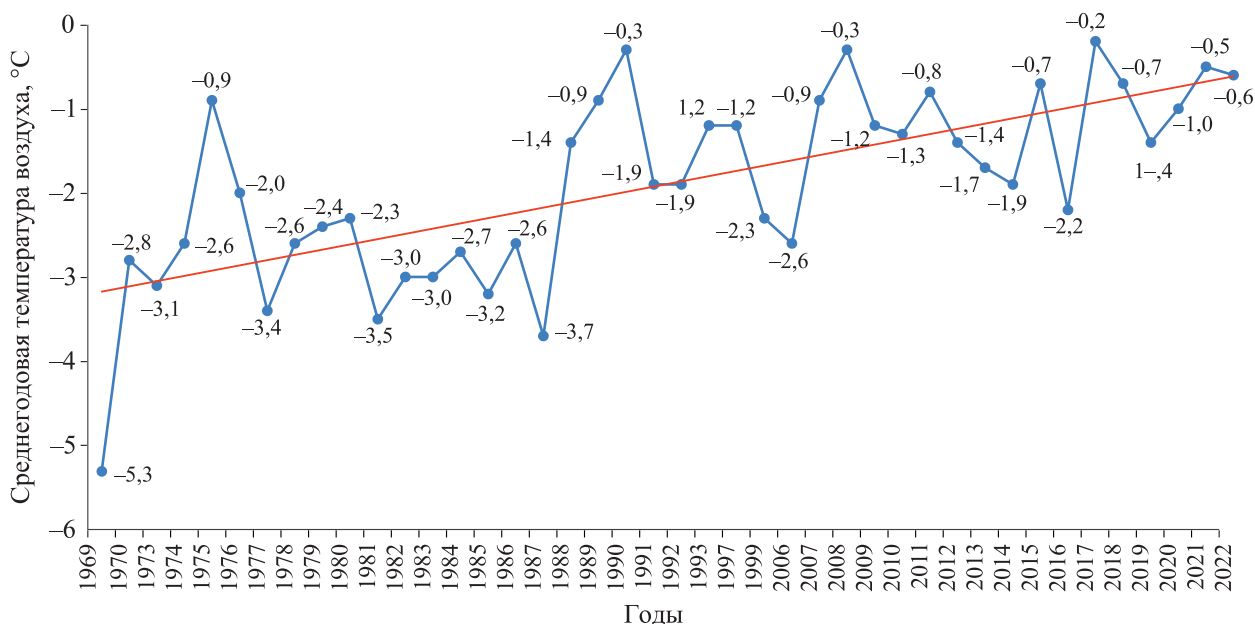


Рис. 2. Динамика среднегодовой температуры воздуха по данным метеостанции им. П. Осипенко за 1969–2022 гг.

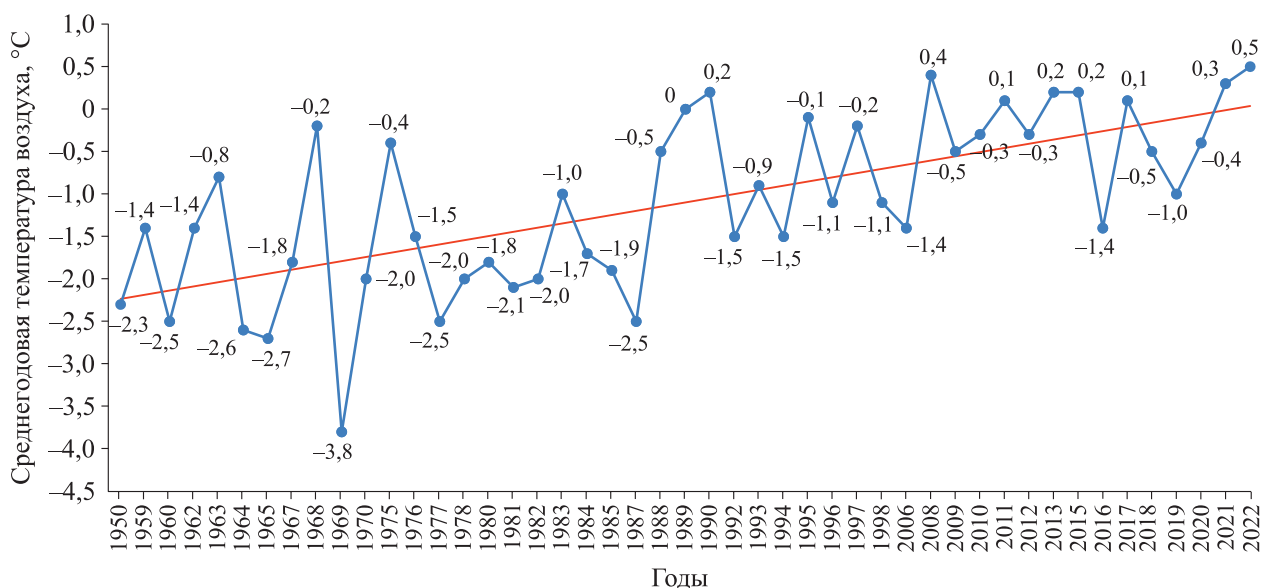


Рис. 3. Динамика среднегодовой температуры воздуха по данным метеостанции Богородское за 1950–2022 гг.

отметить, что в расчете учитывались термокарстовые озера размерами более 20×20 м, ввиду слабой возможности визуальной интерпретации криогенных объектов на имеющихся спутниковых снимках меньшего размера.

На основе оценки густоты озер с использованием данных о взаимосвязи изменения их площади с характером распространения многолетнемерзлых пород [7] определена зональная дифференциация термокарстовых озер в пределах области многолетней мерзлоты, а также выявлены территории озер с отсутствующими площадями ММП, которые интерпретированы по ключевым участкам [8].

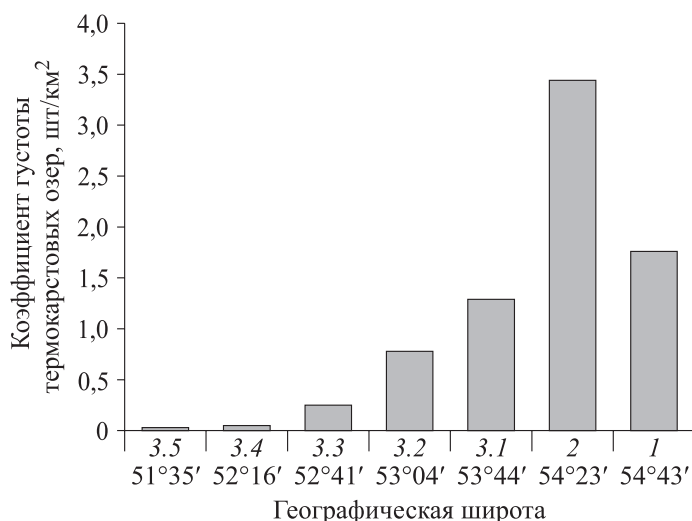


Рис. 4. График зонального распространения термокарстовых озер в относительно холодных континентальных условиях (по западной окраине Нижнеамурской низменности, Удской и Торомской низменностям).

1 — Удская низменность; 2 — Торомская низменность; Тугур-Чукчагир-Эворонская низменность; 3.1 — низменность в приустьевой части р. Тугур; 3.2 — междуречье рек Нимелен и Тугур; 3.3 — междуречье рек Нимелен и Керби; 3.4 — Чукчагирская приозерная часть низменности; 3.5 — Эворонская приозерная часть низменности.

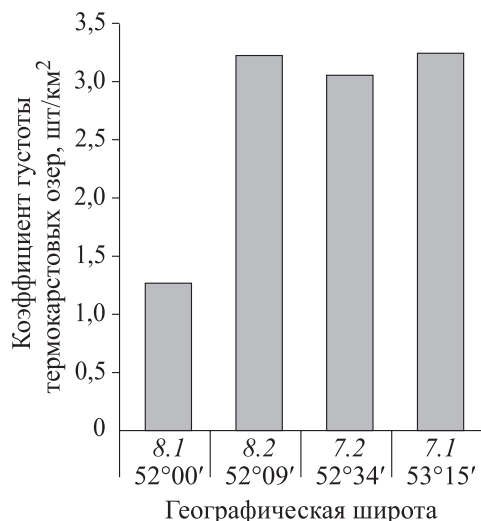


Рис. 5. График зонального распространения термокарстовых озер в относительно теплых приморских условиях (по западному побережью Татарского пролива).

7.1 — приустьевая часть р. Ныгай; 7.2 — междуречная долина рек Зеленая и Уарке; 8.1 — долина р. Нигирь; 8.2 — долина р. Медвежий.

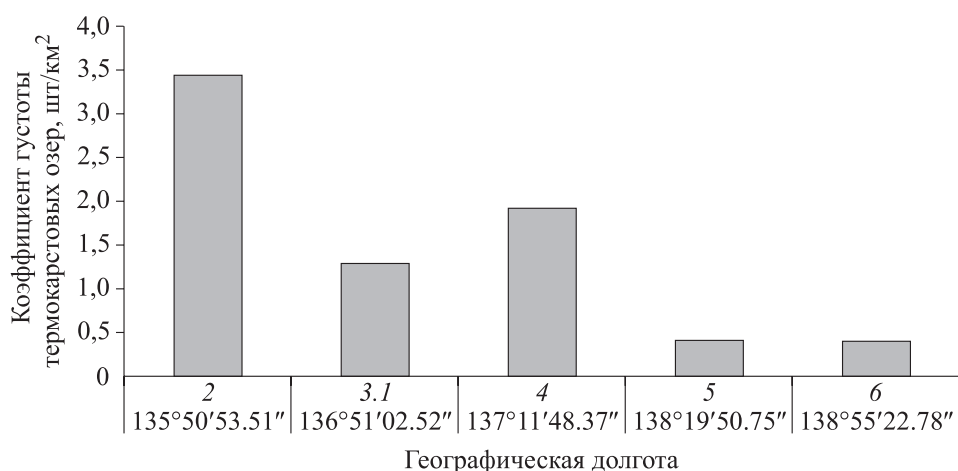


Рис. 6. График субширотного распространения термокарстовых озер (по южному побережью Охотского моря).

2 — долина р. Тором; 3.1 — низменность в приустьевой части р. Тугур; 4 — междуречье рек Сыран и Ульбан; 5 — приустьевая часть р. Усалгин; 6 — Мухтельская низменность.

Густота термокарстовых озер Нижнего Приамурья

Низменность Нижнего Приамурья		Широта площадок термокарстовых озер	Кгв, шт/км²
Название	Участок		
Тугур-Чукчагир-Эворонская депрессия	Эворонская приозерная часть низменности	51°35'	0,03
Приморская низменность Татарского пролива	Долина р. Нигирь	52°00'	1,27
	Долина р. Медвежьей	52°09'	3,23
Тугур-Чукчагир-Эворонская депрессия	Чукчагирская приозерная часть низменности	52°16'	0,05
Приморская низменность Амурского лимана	Междуречная долина рек Зеленая и Уарке	52°34'	3,06
Тугур-Чукчагир-Эворонская депрессия	Междуречье рек Нимелен и Керби	52°41'	0,25
	Междуречье рек Нимелен и Тугур	53°04'	0,78
	Приустьевая часть р. Ныгай	53°15'	3,25
Приморская низменность Амурского лимана	Приустьевая часть р. Усалгин	53°26'	0,41
Побережье залива Николая	Междуречье рек Сыран и Ульбан	53°31'	1,92
Тугур-Чукчагир-Эворонская депрессия	Низменность в приустьевой части р. Тугур	53°44'	1,29
Побережье залива Александры	Мухтельская низменность	54°09'	0,4
Приморская низменность Удского залива	Долина р. Тором	54°23'	3,44
Удская низменность	Междуречье рек Джана и Тутканда	54°43'	1,76

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современный геологический субстрат равнин бассейна нижнего Амура оказывает детерминирующее воздействие на существующие логистические сети, а также имеет важное прогностическое значение при хозяйственном освоении прилегающих территорий. Согласно современным геокриологическим картам и схемам, территория равнин Нижнего Приамурья и Южного Приохотья (см. рис. 1) расположена в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород с преобладанием островного и редкоостровного типов ММП [5].

Ввиду пограничного расположения южной окраины криолитозоны, на территории Нижнего Приамурья практически повсеместно доминирует редкоостровной тип ММП — в пределах Эворонской низменности, приморских низменностей заливов Николая, Ульбанского, Амурского лимана, Татарского пролива и др. Что касается горной части, то И.В. Поздняков [5] выделяет определенную гео-

криологическую дифференциацию ММП, где многолетнемерзлые грунты островного и редкоостровного типов занимают локальные участки среднегорного рельефа с абсолютными высотами более 1100 м (хребты Кивун, Омальский, Омельдинский). Однако, по мнению других исследователей [9], с которыми можно согласиться исходя из современной динамики среднегодовых температур воздуха (см. рис. 2, 3), многолетнемерзлые грунты распространены на высотах более 1500 м.

В пределах северной половины Тугур-Чукчагир-Эворонской депрессии и приморских низменностей Удского залива в настоящее время распространен островной тип многолетнемерзлых грунтов, что связано преимущественно с увеличением суровости геофизиологических условий в западном направлении и влиянием массивности крупных горных хребтов и их периферии на распространение ММП [5].

На основании анализа данных метеостанций можно заключить, что деградация криолитозоны происходит при определяющем тренде повышения среднегодовых температур воздуха, который с 1959 по 2020 г. составил $0,6-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет для западной части Нижнего Приамурья (метеостанция им. П. Осипенко) и $0,14-0,55\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет для восточной (метеостанция Богородское).

Одним из важных признаков деградации мерзлоты равнин Нижнего Приамурья является реакция криолитозоны на современное потепление и оттаивание многолетнемерзлых грунтов, которые приводят к трансформации ландшафта и образованию больших площадей термокарстовых котловин и имеют нехарактерную для основной части криолитозоны Дальнего Востока тенденцию к увеличению площадей термокарстовых озер [10].

Для исследуемых равнин Нижнего Приамурья и Южного Приохотья хорошо прослеживается зональность распространения термокарстовых озер, причем развитие и динамика термокарстовых процессов связаны с приуроченностью территорий к области распространения ММП и участкам, которые на современном этапе расположены за пределами криолитозоны [4, 5].

К участку с относительно холодными континентальными условиями приурочена северная область Тугур-Чукчагир-Эворонской депрессии и приустьевых частей рек Тором и Уда, где отчетливо прослеживается зональность распространения и динамика термокарстового процесса. В южной части депрессии (см. рис. 4), в пределах Эворонской и Чукчагирской низменностей, они слабо выражены вследствие отступления криолитозоны и затухания термокарстового процесса с зарастанием посткриогенных термокарстовых озер.

При движении к побережью Охотского моря наблюдается увеличение густоты термокарстовых озер, что в сочетании с распространением территорий в зоне редкоостровного и островного типов мерзлоты определяет дальнейшую деградацию криолитозоны со смещением к северу ее границ и трансформацию ландшафтных условий. Механизм формирования рельефа приграничных территорий криолитозоны (междуречья рек Нимелен и Тугур, Нимелен и Керби), вероятно, связан с наложением процессов зарастания сформированных термокарстовых озер и озерных котловин и дальнейшим разрастанием озер на участках распространения ММП.

Учитывая специфику промышленного освоения территории, а также перспективы дальнейшего использования равнин в качестве объектов инфраструктуры, можно сделать вывод о высокой степени риска геофизиологической опасности при хозяйственном освоении, строительстве и связывании автодорожной инфраструктурой прибрежных охотоморских поселков с крупными, удаленными от морского берега месторождениями.

Автодорожное сообщение с прибрежными поселками имеет сезонный характер и осуществляется по зимникам, а при строительстве круглогодичного дорожного сообщения необходимо учитывать негативное воздействие термокарстовых процессов и явлений, особенно в долине устьевой части рек Тугур, Тором и Уда, где уже сейчас наблюдается высокая степень густоты озер, а в перспективе возможно увеличение их площадей [7] в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых грунтов. В настоящее время идет строительство Тихоокеанской железной дороги от Эльгинского каменноугольного месторождения к побережью Удской губы, где проектными решениями должны учитываться геофизиологические условия проектируемой трассы, а также развитие и степень влияния термокарстовых процессов.

Учитывая зональность распространения термокарстовых и других криогенных процессов, можно сделать вывод, что степень геоэкологического риска освоения территории также будет иметь зональный характер. Для приморских низменностей западного побережья Татарского пролива, где, по данным [4, 5], основным типом мерзлоты являются талые грунты [5], а также возможно проявление новообразований в виде миграционных бугров пучения [8, 11], зональность распространения термо-

карстовых озер не прослеживается. Степень густоты озер связана преимущественно с посткриогенным типом их распространения и относительно теплым климатом, который характеризуется менее низкими температурами в зимний период, нежели климат в районе Тугур-Чукчагир-Эворонской депрессии, расположенной на таких же широтах (см. рис. 5).

Сформированные в эпоху голоценового климатического оптимума, посткриогенные термокарстовые озера равнин западного побережья Татарского пролива [8] существуют и в настоящее время, но уже в стадии деградации. Отсутствие здесь ММП, за исключением ограниченного распространения новообразований (миграционные бугры пучения и перелетки) на участках болот [8, 11], говорит об удовлетворительных геоэкологических условиях при хозяйственном освоении и низкой степени воздействия многолетнемерзлых грунтов как на объекты инфраструктуры, так и на логистические объекты освоения территории побережий и прилегающих участков разработок полезных ископаемых.

Равнины побережья Охотского моря приурочены преимущественно к зоне островного и редко-островного распространения ММП [5], а также изолированного и спорадического [4]. На прибрежных приморских низменностях в приустьевых частях долин рек Сыран, Ульбан, на Мухтельской низменности и др. имеются участки талых грунтов с озерами. Распространение термокарстовых озер и их динамика (см. рис. 6) связаны с общей тенденцией к увеличению площадей ММП при движении с востока на запад и увеличению континентальности климата от побережья Татарского пролива вглубь континента с учетом влияния холодного климата Охотского моря и природно-климатических особенностей огромного Буреинского горного массива. Имеющиеся данные [5] свидетельствуют о преимущественно посткриогенном характере термокарстовых озер в пределах Мухтельской низменности, долин рек Сыран, Ульбан и Усалгин и о криогенном происхождении озер в приустьевой части р. Тугур и долины р. Тором.

С учетом воздействия на хозяйственную деятельность и на основе оценки состояния территории при промышленном освоении прилегающих территорий равнин южного побережья Охотского моря выделяются участки удовлетворительных и негативных геоэкологических условий. К первым относятся равнины устьевой части долин рек Сыран, Ульбан, Мухтельской низменности, где в настоящее время практически отсутствуют ММП. Термокарстовые процессы здесь не повлияют на строительство и создание объектов логистики, а сложности освоения будут связаны с процессами пучения и формирования рельефа морозобойного растрескивания деятельного слоя.

К участкам повышенной геокриологической опасности следует отнести приустьевые участки рек Тугур, Тором и Уда, где в настоящее время распространены большие площади ММП и активно развиваются термокарстовые процессы. В дальнейшем расширение площадей с развитием термокарстовых озер отразится на увеличении степени их густоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное положение бассейна нижнего Амура на южной периферии области распространения ММП и активное повышение среднегодовых температур воздуха определяют обширную трансформацию ландшафтов, активизацию неблагоприятных и опасных геокриологических процессов, что в конечном итоге влияет на объекты хозяйственной инфраструктуры и требует разработки моделей, прогнозирования и определения перспектив использования территорий при дальнейшей освоении.

Исследование закономерностей распространения термокарстовых озер показало (см. таблицу), что, в отличие от участков с относительно холодными континентальными условиями, где количество озер увеличивается по направлению к северу, на участках с относительно теплыми приморскими условиями густота озер связана в основном с посткриогенным равномерным по площади типом их распространения. Отдельно следует выделить субширотное распространение термокарстовых озер по южному побережью Охотского моря, где увеличение степени густоты термокарстовых процессов преимущественно обусловлено тенденцией к увеличению площадей ММП в направлении на запад. Это связано с современными геолого-геокриологическими условиями равнин и смягчением климатических условий на приморских территориях, расположенных восточнее.

Характер распространения ММП и высокие значения густоты термокарстовых озер в относительно холодных условиях Тугур-Чукчагир-Эворонской депрессии, долин рек Тором, Тугур и Уда определяют существенные геоэкологические риски при освоении территорий. Широкое распространение посткриогенных термокарстовых озер на побережье Татарского пролива обуславливает удовлетворительные геоэкологические условия для хозяйственного освоения. На равнинах южного побережья Охотского моря выделяются участки с удовлетворительными и негативными геоэкологическими ус-

ловиями, примерное разграничение которых будет соответствовать границам распространения различных типов ММП и площадям талых грунтов.

Деградация ММП и, как следствие, активизация термокарстовых процессов существенным образом влияют на дальнейшее освоение территорий и определяют развитие геоэкологических рисков при строительстве объектов промышленной и логистической инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Специализированные** массивы для климатических исследований. 2000, 2011, 2018–2022 / ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. — <http://www.gpntb.ru/-win/search/help/el-cat.html> (дата обращения 20.12.2023).
2. **Погода** в 240 странах мира [Электронный ресурс]. — <https://rp5.ru> (дата обращения 21.11. 2023).
3. **Климатический** мониторинг [Электронный ресурс]. — <http://www.pogoda-iklimat.ru/monitors.php?id=rus&month=1&year=1881> (дата обращения 21.11. 2023).
4. **Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H.H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Etzelmuller B., Kholodov A., Khomutov A., Kaab A., Leibman M.O., Lewkowicz A.G., Panda S.K., Romanovsky V., Way R.G., Wu T., Yamkhin Ja., Zou D., Westergaard-Nielsen A.** Northern Hemisphere Permafrost Map Based on TTOP Modelling for 2000–2016 at 1 km² Scale // *Earth-Science Reviews*. — 2019. — Vol. 193. — P. 299–316.
5. **Поздняков И.В.** Мерзлые породы Северного Приамурья. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 1996. — 175 с.
6. **Ершов Э.Д.** Геокриологии СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. — М.: Недра, 1989. — 516 с.
7. **Родионова Т.В.** Исследование динамики термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М., 2014. — 26 с.
8. **Брагин А.Н.** Остатки реликтовой мерзлоты на побережье Татарского пролива // *География и природ. ресурсы*. — 2021. — Т. 42, № 1. — С. 134–140.
9. **Махинов А.Н., Махинова А.Ф.** Ледниковые и перигляциальные формы рельефа в современных ландшафтах Приамурья и Приохотья // *Материалы X Всерос. совещания по изучению четвертичного периода «Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований»*. — М.: Геос, 2017. — С. 253–256.
10. **Кравцова В.И.** Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // *Криосфера Земли*. — 2009. — Т. 13, № 2. — С. 16–26.
11. **Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н., Станиловская Ю.В.** Миграционные бугры пучения в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока // *Инженерная геология*. — 2014. — № 1. — С. 40–64.

Поступила в редакцию 23.11.2023

После доработки 21.02.2024

Принята к опубликованию 11.07.2024