

УДК 911.2:911.37

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ЖИЗНЕСТОЙКОСТИ АРКТИЧЕСКИХ ГОРОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ

© 2021 г. А. А. Медведков*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

**e-mail: a-medvedkov@bk.ru*

Поступила в редакцию 13.06.2020 г.

После доработки 10.07.2021 г.

Принята к публикации 13.07.2021 г.

Рассмотрены факторы природно-географической среды, опосредованно влияющие на структуру экономического пространства, стоимость жизни и условия развития арктических городов в условиях криолитозоны. Базируясь на современных представлениях о характерном времени изменений разных компонентов геосистем и принимая во внимание масштаб трансформационных последствий, выделены три группы факторов: инертные (биогеохимическая специализация территории, характер распространения многолетнемерзлых пород в течение ближайших 25–30 лет), относительно инертные/слабо меняющиеся (расчлененность территории, направление и скорость вертикальных движений земной коры, льдистость многолетнемерзлых пород, тепловая дискомфортность, дефицит биологически активной ультрафиолетовой радиации, изменчивость атмосферного давления, потенциал самоочищения атмосферы) и динамичные (характер водоснабжения, среднегодовая температура многолетнемерзлых пород на подошве слоя годовых колебаний, мощность слоя сезонного промерзания и оттаивания, сток взвешенных наносов в пределах освоенного водосбора малой или средней реки, биологическая продуктивность ландшафтов). Рассматриваемые факторы влияют на жизнестойкость арктических городов, а усилению их значения способствуют быстрые климатические изменения и возрастающая антропогенная нагрузка. Для оценки влияния данных факторов на развитие арктических городов и сопоставления их значения в динамике предложены следующие индикаторы: площадная оценка пораженности процессами термоденудации, густота овражной сети, модуль стока, повторяемость и продолжительность наводнений, динамика индексов теплового комфорта, количество эндемических заболеваний и их динамика, тренд заболеваемости населения в увязке с расчетной величиной потенциала загрязнения атмосферы. Анализируемые факторы рассмотрены в рамках концепции жизнестойкости, используемой в качестве базовой при анализе систем, развивающихся в условиях повышенных рисков внешней среды.

Ключевые слова: Арктика, Крайний Север, городские населенные пункты, экстремальные города, мерзлотные ландшафты, изменения климата, экологические индикаторы, горизонты планирования, резистентность

DOI: 10.31857/S2587556621050071

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Жизнестойкость арктического города зависит от целого комплекса факторов, имеющих прежде всего экономический и социальный генезис (Building ..., 2013). Наряду с этим, безусловно, важная роль принадлежит группе природно-экологических факторов, опосредованно влияющих на структуру экономического пространства, стоимость жизни и условия развития любого города в условиях Арктики (Природно-климатические ..., 2018; Ракита, 1983; Ракитина, Климович, 1974; Эколого-географические ..., 2011; Streletskiy et al., 2019). Данная группа факторов влияет также и на особенности восприятия города его жителями, от

чего зависит их ментальное поведение. Так, социологические исследования показывают (Бурцева и др., 2020), что жители северных городов трактуют суровый климат, полярную ночь и экологическую обстановку как наиболее сложные для жизни в циркумполярной среде. В условиях криолитозоны зависимость от факторов природно-географической среды увеличивается, что обусловлено повышенной уязвимостью мерзлотных ландшафтов к любому внешнему воздействию и их пониженной способностью к нейтрализации чужеродных веществ и избыточных потоков энергии. Известно, что освоенные территории в условиях криолитозоны характеризуются более ин-

тенсивным развитием инженерно-геологических процессов (Воскресенский, 2001; Горшков, 2001; Лихачева и др., 2018; Якубсон и др., 2012). Поэтому в рамках данной статьи мы остановимся на наиболее сложной по природным условиям части Российской Арктики, функционирующей в условиях режима многолетнемерзлых грунтов. Риски и их проявление в пространственно-временном континууме обусловлены разной степенью динамики факторов природно-географической среды. В связи с этим часть факторов рассматриваются нами как *инертные* и *относительно инертные (слабо меняющиеся)*, а другая часть — как *динамичные*.

Инертные и относительно инертные факторы оцениваются нами как определяющие фоновые условия развития арктических городов, их стоит учитывать при долгосрочном и среднесрочном планировании. Тогда как динамичные факторы способны в краткосрочной перспективе изменить средовые условия существования городских центров в Арктике. Безусловно, важный фактор, который необходимо сегодня учитывать, это изменение климата, влияющее на комфортность погодных условий (жесткость погоды), состояние многолетнемерзлых пород и качество жизнеобеспечивающих ресурсов (в том числе и водных в случае преобладания поверхностных источников водоснабжения), экзогенную динамику и инженерно-геологические риски, биопродуктивность и динамику ареалов природно-очаговых заболеваний. В условиях быстрых климатических изменений для оценки саморегуляции арктических городов наиболее предпочтительна концепция жизнестойкости, а не устойчивого развития, подразумевающая баланс в системе экономики, социума и окружающей среды при относительно неизменных внешних условиях. В последнее десятилетие концепция жизнестойкости (resilience) стала набирать популярность в научной среде, особенно это проявляется в работах по изучению социально-экологических систем и арктических территорий (Замятина и др., 2020; Building ..., 2013). Концепция жизнестойкости в своей основе ориентируется на оценку адаптационных возможностей объекта в условиях шоковых воздействий, т.е. меняющихся условий внешней среды и возникающих в связи с этим рисков (Замятина и др., 2020). Именно от данной концептуальной основы мы и будем отталкиваться при выборе индикаторов для сравнительного анализа роли факторов природно-географической среды в оценке жизнестойкости городов в условиях меняющейся среды. В методологическом отношении мы также будем опираться на научные работы, посвященные оценке влияния природно-климатических изменений на социально-экономическое развитие территорий, городов и поселков (в том числе с учетом арктической специфики) (Медведков,

2017; Эколого-географические ..., 2011; Medvedkov, 2013; Osipov et al., 2019; Streletskiy et al., 2019).

Подробно охватить все возможные факторы природно-географической среды сложно, поэтому в данной работе представлены ключевые признаки-индикаторы, имеющие первостепенное значение, и приведено обоснование их значимости. Все отобранные факторы распределены на отдельные группы в связи с оценкой их динамичности и потенциального влияния на развитие урбанизированных территорий в Арктике (рис. 1). В качестве иллюстрации влияния разных факторов в статье приведены наиболее типичные примеры городских населенных пунктов (табл. 1), подверженных их воздействию.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Инертные факторы природно-географической среды. К их числу отнесены компоненты геосистем, характеризующиеся в ближайшие десятилетия стабильностью своих основных характеристик с учетом прогнозируемых изменений окружающей среды. Рассмотрим группу данных факторов, которые, тем не менее, ослабляют жизнестойкость арктических городов.

Биогеохимическая специализация территории определяет бигеохимическую ситуацию в городском ландшафте и его окрестностях. Анализ биогеохимических условий представляется важным для выявления аномалий природного происхождения, вызывающих определенные виды заболеваний. Природные аномалии в значительной степени обусловлены геолого-структурными особенностями территории, ее металлогенией, спецификой поверхностных отложений, вертикальной геохимической зональностью подземных вод и условиями миграции элементов и их соединений. Особенно типичны геохимические аномалии для районов рудных месторождений, каждому типу из данной категории месторождений присущи свои геохимические ассоциации химических элементов, которые и вызывают разные виды заболеваний. Анализ данных, направленный на выявление взаимосвязей между распространением патогенных геохимических полей и заболеванием населения, показывает на их связность между собой (Певзнер, Ермаков, 2001). К тому же важно понимать, что самоочищающаяся способность почв в условиях криолитозоны ослаблена ввиду их незначительной мощности, ослабленного дренажа, ежегодного промерзания и др. Все это способствует концентрации загрязнителей, а наиболее ярко это проявляется вблизи источников загрязнения (Макаров, 2010).

Наряду с наличием очаговых геохимических аномалий с повышенной концентрацией в компонентах ландшафта отдельных элементов и их



Рис. 1. Факторы природно-географической среды и индикация их влияния.

1 — относительное количество эндемических заболеваний; 2 — площадь территории с многолетнемерзлым режимом грунтов; 3 — площадные характеристики распространения криогенных процессов; 4 — глубина расчленения территории; 5 — густота расчленения территории; 6 — направление и скорость вертикальных движений земной коры; 7 — льдистость в разных литологических условиях; 8 — индекс теплового дискомфорта; 9 — заболеваемость населения в увязке с расчетной величиной потенциала загрязнения атмосферы; 10 — показатели качества питьевой воды из источников поверхностного водоснабжения, наиболее подверженных загрязнению; 11 — температура многолетнемерзлых пород в разных литологических условиях; 12 — глубина сезонного оттаивания и промерзания в разных литологических условиях; 13 — модуль стока; 14 — повторяемость наводнений с наибольшими суммами материального ущерба; 15 — годовая продукция фитомассы.

соединений для арктических территорий типична слабая минерализация воды, используемой для водоснабжения. Это определяет дефицит ряда элементов, что повышает риск развития заболеваний: гипертонической болезни (дефицит Mg, Ca), патологии щитовидной железы (дисбаланс I, Se, Mn, Co, Ca, Mg и др.), иммунодефицитных состояний (дефицит Se, I, Zn), артрозов (дефицит или избыток Ca, S, Sr и др.), мочекаменной болезни (избыток Ca, Si), болезней зубов (дисбаланс Ca, F) и др. (Карапетян и др., 2013). Наряду с этим для подземных вод криолитозоны типичны аномалии железо- и марганцосодержащих вод, что обусловлено дефицитом кислорода в их межмерзлотных и подмерзлотных горизонтах и пониженными значениями их окислительно-восстановительного потенциала (E_h). Таким образом, значение окислительно-восстановительного потенциала — важнейший фактор, регулирующий содержание элементного состава подземных вод (Геохимия ..., 2012). Известно, что уменьшение E_h подземных вод способствует образованию гидрохимических аномалий. Это делает подземные воды крайне уязвимыми к увеличению содержания отдельных элементов и их соединений до концентраций,

оказывающих токсическое воздействие на организм человека (Крайнов, Закутин, 1994). Промонстрируем последствия этого на примере самых распространенных случаев положительных аномалий элементов в Арктике. Так, известно, что избыток железа в организме не только влечет снижение его иммунитета, но и усиливает разрастание опухолевых клеток (Поляк-Блажи, 2002), а избыточное поступление марганца оказывает на него нейротоксическое воздействие и способствует увеличению утомляемости (Шестова и др., 2014).

Данные о геохимической ситуации позволяют как прогнозировать появление эндемических заболеваний, так и управлять ими через коррекцию элементного статуса населения. Биогеохимическую специализацию территории важно учитывать не только для обоснования необходимости совершенствования технологии водоподготовки, но и в тех случаях, когда жизнедеятельность населенных пунктов в значительной степени базируется на самообеспечении продовольственными продуктами за счет личных подсобных хозяйств или других видов местных сельскохозяйственных

Таблица 1. Примеры влияния факторов природно-географической среды

Фактор природно-географической среды	Конкретное проявление фактора, снижающего жизнестойкость городских населенных пунктов	Городские населенные пункты с проявлением влияния указанного фактора	Источник
1. Биогеохимическая специализация территории	Повышенное (относительно ПДК) содержание Fe в надмерзлотном горизонте подземных вод	Анадырь, Билибино, Верхоянск, Певек, Среднеколымск, Тикси, Усть-Нера, Черский, Ямбург	(Крайнов, Закутин, 1994)
	Повышенное (относительно ПДК) содержание Mn в подземных водах	Губкинский, Муравленко, Надым, Новый Уренгой, Ноябрьск, Уренгой, Тарко-Сале	(Крайнов, Закутин, 1994)
	Повышенное (относительно ПДК) содержание Al в подземных водах	Нарьян-Мар	(Крайнов, Закутин, 1994)
2. Распространение многолетнемерзлых пород	Сплошное распространение многолетней мерзлоты (>90%)	Анадырь, Билибино, Верхоянск, Воркута, Дудинка, Игарка, Норильск, Среднеколымск, Тикси, Усть-Нера, Хандыга, Харп, Черский, Ямбург	(NSIDC)
	Прерывистое распространение многолетней мерзлоты (50–90%)	Губкинский, Лабытнанги, Муравленко, Надым, Новый Уренгой, Пангоды, Салехард, Тарко-Сале, Уренгой	(NSIDC)
3. Расчлененность территории	Наибольшие значения глубины расчленения территории (>5° – средний уклон в окружности радиусом 10 км)	Билибино, Верхоянск, Усть-Нера, Харп	(ArcticDEM Release 7)
	Наибольшие значения густоты расчленения территории (>10 км/100 кв. км)	Воркута	(Национальный..., 2007)
4. Направление и скорость вертикальных движений земной коры	Интенсивные вертикальные движения земной коры с положительным знаком (≥ 10 мм/год)	Билибино, Черский	(Национальный..., 2007)
5. Лыдность многолетнемерзлых пород	Наибольшие значения лыдности многолетнемерзлых пород (>40%)	Вилуйск, Дудинка, Муравленко, Новый Уренгой, Среднеколымск, Хандыга, Харп, Черский, Ямбург	(NSIDC)
6. Климатическая дискомфортность	Максимальные значения индекса теплового дискомфорта для зимнего периода (-40° и ниже)	Билибино, Воркута, Нарьян-Мар, Норильск, Усть-Нера	(Виноградова, 2019)
7. Потенциал самоочищения атмосферы	Низкая степень самоочищения атмосферы (ПЗА по Э.Ю. Безуглой >3.0–3.3 усл. ед.)	Билибино, Верхоянск, Вилуйск, Среднеколымск, Усть-Нера, Черский	(Клюев, 2019)
8. Характер водоснабжения	Поверхностные источники водоснабжения замкнутого типа, располагающиеся в поселениях с угольной энергетикой	Анадырь, Певек*	(Экологический..., 2017)

Таблица 1. Окончание

Фактор природно-географической среды	Конкретное проявление фактора, снижающего жизнестойкость городских населенных пунктов	Городские населенные пункты с проявлением влияния указанного фактора	Источник
9. Температура многолетнемерзлых пород	Высокотемпературные пластично-мерзлые грунты (от -0.1 до -1.0°C)	Надым, Ноябрьск, Муравленко	Экологический ..., 2017)
	Мерзлые грунты, которым необходимо дополнительное охлаждение (от -1.0 до -3°C)	Воркута, Губкинский, Новый Уренгой, Уренгой, Тарко-Сале	Экологический ..., 2017)
10. Мощность сезонного оттаивания	Максимальная мощность сезонного протаивания в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород ($>1.5-2$ м)	Билибино, Верхоянск, Воркута	Экологический ..., 2017)
10. Биопродуктивность ландшафтов	Наименьшие значения годичной продукции фитомассы (от 1.0 до 2.5 т/га/год)	Билибино, Тикси, Усть-Нера	(Национальный ..., 2007)

* Необеспеченные ресурсами подземных вод.

предприятий (гг. Воркута, Нарьян-Мар, Норильск, Анадырь, Певек и др.).

Распространение многолетнемерзлых пород. Криолитозону в зависимости от соотношения талых и мерзлых пород принято подразделять на следующие области (NSIDC): со сплошным распространением мерзлых пород (более 90% площади с льдистыми породами), с прерывистым (от 50 до 90% площади с льдистыми породами), с островным (менее 50% площади с льдистыми породами). Характер распространения многолетней мерзлоты в Арктике до середины XXI в. оценивается как полностью инертный фактор. Данный вывод опирается на прогноз максимально возможных изменений (Intergovernmental ..., 2008) по одному из наименее оптимистичных, т.е. “жестких”, сценариев IPCC.

Важно отметить, что в условиях криолитозоны развитие ландшафтов и скорость их восстановления после антропогенной трансформации определяются геоэкологическими особенностями территории. Чем массивнее мерзлотные толщи, учитывая их площадные параметры и мощность по глубине, тем ниже биопродукционный потенциал ландшафтов и способность территории к восстановлению при антропогенной трансформации. Наряду с этим массивность мерзлотных толщ определяет инерционность состояния геосистем при любых внешних воздействиях. Также от площади распространения многолетнемерзлых пород зависит и степень потенциальной активности криогенных процессов, на интенсивность

которой также влияет расчлененность рельефа и биологическая продуктивность ландшафтов.

Относительно инертные/слабо динамичные факторы природно-географической среды. Динамикой обозначенной группы факторов в краткосрочной перспективе можно пренебречь, но эти факторы необходимо учитывать при стратегическом планировании городского пространства в Арктике, и они уже сейчас требуют исследовательского внимания и соответствующего учета в моделировании урбанизационных процессов.

Расчлененность территории (степень изрезанности земной поверхности) можно определить с помощью количественных показателей, таких как амплитуда расчленения, углы наклона и т.д. По ЦМР (цифровая модель рельефа) рассчитывают индексы расчлененности рельефа (Terrain Rug- gendness Index) как средние значения перепада относительных высот между ячейками трехмерного изображения земной поверхности (Reily et al., 1999). Чем выше амплитуда, тем больше запас потенциальной энергии и тем активнее себя проявляют деструктивные процессы (Механизмы ..., 1998). Расчлененность территории осложняет хозяйственное освоение территории, а при нарушении почвенно-растительного покрова способствует усилению денудационных процессов и росту их энергетического потенциала. Известно, что степень расчленения в значительной степени зависит от погодно-климатических особенностей, водопроницаемости слагающих горных пород и характера растительности. В условиях крио-

литозоны водопроницаемость существенно ограничена ввиду наличия мерзлого водоупора, а степень этого ограничения зависит от характера распространения (сплошности) льдистых пород. К тому же разреженная растительность способствует локализации поверхностного стока, что способствует увеличению его энергического потенциала и денудационной роли. Поэтому дальнейшее освоение территорий с расчлененным рельефом и их преобразование в условиях криолитозоны из квазиприродных (условно-коренных или вторично-производных) геосистем в техногенные (городские и горно-промышленные комплексы) сопряжено с высоким риском активизации опасных криогенных процессов. Характер и неоднородность рельефа позволяет также судить о предрасположенности ландшафтных комплексов криолитозоны к развитию того или иного экзогенного процесса. Так, в пределах равнинных территорий и горных долин получили преимущественное развитие процессы термокараста, термоэрозии, пучения грунта и солифлюкции. Тогда как в горных районах наибольшее развитие получили курумы, наледи и солифлюкционные оползни. Естественно, что данный комплекс криогенных процессов типичен для континентальных районов, а на арктическом побережье превалирует термоабразия. При техногенном воздействии величина удельной энергии рельефа может увеличиваться в несколько раз (Воскресенский, 2001), что необходимо учитывать при прогнозировании освоения территорий с разной контрастностью морфометрических условий. Таким образом, степень расчлененности рельефа как одна из важнейших составляющих оценки денудационного потенциала позволяет в значительной степени ранжировать территории по степени гравитационной неустойчивости, что особенно актуально для районов с уязвимой литогенной основой. Уязвимость литогенной основы в целом является типичной особенностью арктических районов, отличающихся широким развитием многолетнемерзлых грунтов. Расчлененность рельефа в данных условиях — это значимый фактор изменения геосистем, зачастую достаточно быстрых.

Направление и скорость современных вертикальных движений земной коры. Данный параметр оценивается по геодезическим данным, прежде всего по результатам повторного государственного нивелирования, с привлечением методов космической геодезии (GPS-измерений и спутниковой альтиметрии) и сопутствующих подходов — анализа разновременных аэроснимков, карт, вплоть до использования археологических материалов (Галаганов и др., 2011; Национальный ..., 2007). Скорость прогибания или поднятия отражается в рельефе местности, который выступает в качестве важнейшего фактора перераспреде-

ния тепла и влаги. Для условий криолитозоны это имеет принципиальное значение, поскольку “запас холода” в многолетнемерзлых породах определяется не столько их температурой, сколько энергией кристаллизации подземных льдов, которая зависит от влажности почвогрунтов (Раки-та, 1983). Повышение влажности грунтов существенно влияет на теплопроводность, теплоемкость, теплоту фазовых переходов, а через эти факторы и на глубину промерзания и оттаивания. Таким образом, повышение влажности грунтов способствует росту энергетической устойчивости льдистых пород — способности сопротивляться нагреванию и оттаиванию (Механизмы ..., 1998). Поэтому гидроморфные ландшафты более инертны к климатическим изменениям из-за больших затрат на испарение и фазовые переходы вода-лед (Медведков, 2018). В связи с этим представляется, что повышение влажности почвогрунтов влияет на степень реакции льдистых пород к климатическим изменениям. Чем больше накопленные “запасы холода”, тем требуется больше энергии для полного оттаивания грунта. Также это способствует созданию условий для происходящего сейчас новообразования льдистых пород, что может проявляться в наиболее благоприятных для этого литолого-геоморфологических и ландшафтно-экологических условиях. Весьма полезными в этом отношении могут быть данные, полученные на ключевых участках в южной периферии криолитозоны, поскольку в экотонных ландшафтах природные трансформации проявляются значительно быстрее (Медведков, 2018; Medvedkov, 2013).

Таким образом, направление и характер неотектонических движений влияют на геокриологические условия и состояние льдистых пород (Баулин, 1970). Это представляется важным для прогнозирования ситуации в арктических городах в условиях климатических изменений. К сожалению, не вся территория Российской Арктики обеспечена результатами повторного нивелирования. Особенно удивительно, что в эту категорию помимо практически совсем незаселенных территорий попадает и север Западной Сибири в административных границах Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Тем не менее представляется, что в данном случае заметные перспективы имеет использование метода аналогов. В конкретном случае его сущность заключается в применении имеющихся данных по схожей в генетическом отношении тектонической структуре — молодой платформе эпипалеозойского возраста, испытывающей незначительные отрицательные движения земной коры (–4 мм/год). Указанные значения фиксируются на территории Ненецкого автономного округа — соседнего по отношению к ЯНАО субъекту РФ. В дополнение к сказанному отметим, что современные верти-

кальные движения земной коры унаследованы от более древнего структурно-тектонического каркаса природного региона, а их скоростные величины хорошо согласуются с интенсивностью поднятия в голоцене (Никонов, 1977). Указанное обстоятельство также позволяет нам использовать имеющиеся данные и полученные выводы по генетически аналогичным структурам земной коры для их экстраполяции на соседние территории.

Скорости вертикальной составляющей в пределах равнинно-платформенных областей измеряются обычно от 0.1 до 4 мм/год, но в некоторых частях Российской Арктики их значения в пределах обозначенных структур могут достигать десятки мм/год (Национальный ..., 2007). Это типично для г. Дудинка (–20 мм/год), г. Норильск (–14 мм/год), г. Билибино (12 мм/год), пгт Черский (≈10 мм/год) и некоторых других населенных пунктов. Представляется, что столь интенсивные вертикальные движения могут в некоторой степени нивелировать эффект потепления климата (за счет усиления заболачивания в случае отрицательного тренда) или его усилить (при положительных значениях за счет увеличения дренажированности территории). Однако подавляющая часть городов Сибирской Арктики располагается на участках со слабо отрицательными движениями земной коры (от –2 до –4 мм/год). И, тем не менее, данный фактор требует учета в геоэкологическом прогнозировании и стратегическом планировании городского развития тех территорий, которые в условиях криолитозоны характеризуются интенсивными вертикальными движениями. Факт расположения города в области интенсивных отрицательных движений земной коры не следует детерминировать, поскольку важнейший в городских условиях способ регулирования температурного режима многолетнемерзлых грунтов – оптимизация застройки и структуры озелененных территорий. Опора на эти факторы необходима для разработки адаптационных мероприятий к потеплению климата, которые в значительной степени должны базироваться на управлении турбулентным теплообменом с приземной атмосферой. Для этих целей в масштабах города возможно использование данных тепловой инфракрасной съемки, результаты обработки которых могут служить основой для регулирования ландшафтно-геофизических процессов на освоенных территориях криолитозоны (Балдина, Дедова, 2016; Медведков, 2016).

Льдистость многолетнемерзлых пород различается в зависимости от свойств грунтов – типов четвертичных образований (Ракита, 1983): малольдистые, преимущественно пески и скальные породы (содержание льда – менее 20%), среднелльдистые суглинки и супеси (содержание льда 20–40%) и сильнольдистые, представленные

озерно-болотными и аллювиальными типами генетических отложений в форме торфяных масс и суглинистых накоплений (содержание льда – более 40%). Таким образом, фактор характера четвертичных отложений уже включен в параметры льдистости, поэтому в качестве отдельного показателя/параметра мы его рассматривать не будем. В пространственном распространении мерзлотных ландшафтов на юге криолитозоны ключевую роль играет литолого-генетический фактор, определяющий состав отложений и условия их формирования (Медведков, 2018; Ракита, 1983). Так, установлено (Втюрин, 1975), что льдистые породы в области распространения высокотемпературной мерзлоты приурочены в основном к районам формирования тонкодисперсных отложений разного генезиса (аллювиально-озерных, делювиальных и др.). Важно заметить, что это справедливо для районов, входящих в пределы высокотемпературной криолитозоны. Тогда как в районах с низкотемпературной мерзлотой практически все рыхлые отложения, а в отдельных случаях – скальные грунты, отличаются значительной льдистостью (Ракита, 1983).

По мнению инженерных геологов (Втюрин, 1975), на слабольдистых грунтах строительство возможно на скальных грунтах без учета мерзлого состояния. На среднелльдистых породах учет их мерзлого состояния обязателен при любом строительстве. На сильнольдистых грунтах любое строительство обязательно должно вестись с сохранением мерзлого состояния пород.

Биоклиматические характеристики, под которыми понимается комплекс климатических показателей, важных с точки зрения экологии человека. Эти параметры применительно к территории России достаточно подробно рассмотрены в недавних работах коллектива авторов из Института географии РАН (Природно-климатические ..., 2018), поэтому в данной статье мы не будем подробно останавливаться на их обосновании, а только лишь перечислим наиболее значимые, на наш взгляд, индикаторы. Представляется, что для оценки комфортности проживания и выявления трендов биоклиматической динамики в дальнейшем следует использовать индекс жесткости погоды по Бодману или индекс влажного ветрового охлаждения Хиля. Данные индексы используются как показатели климатической дискомфортности, т.е. совместного действия температуры и влажности воздуха, скорости ветра, и в плане пространственных закономерностей дают схожие результаты. Отдельного внимания заслуживает универсальный индекс теплового комфорта (Виноградова, 2019; Fiala et al., 2012), прошедший широкую апробацию от арктических до тропических районов. Данный индекс учитывает не только скорость ветра, среднюю температуру воздуха и ее относительную влажность, но и современную

модель теплоизоляции одежды. Для более полной картины следует также учитывать дефицит биологически активной ультрафиолетовой радиации Солнца (в месяцах), а также степень изменчивости атмосферного давления (в форме среднеквадратического отклонения его суточных величин). Происходящие мезомасштабные изменения циркуляционных процессов актуализируют значение данных показателей.

Потенциал самоочищения атмосферы и тенденция его изменения. Для промышленных городов со значительными объемами выбросов загрязняющих веществ особенно значимым является анализ потенциала самоочищения в приземном слое атмосферы (Безуглая, 1980). Данный фактор представляет важность и для небольших городов, энергетика которых основывается на использовании угля. Городские населенные пункты, располагающиеся в областях с более выраженными континентальными особенностями климата, характеризуются более высоким уровнем загрязнения воздуха, что обусловлено сравнительно невысоким природным потенциалом самоочищения атмосферы. При этом высокая степень самоочищения атмосферы от поллютантов может также создавать угрозу для населения, собирающего дикоросы, занимающегося рыболовством, т.е. использующего местные продовольственные ресурсы. Это обусловлено тем, что осаждающиеся загрязнители поступают из вторичных источников — промежуточных звеньев миграции и компонентов, аккумулирующих загрязняющие вещества (Исаченко, 2003). Представляется, что в условиях происходящего потепления климата потенциал самоочищения атмосферы имеет тенденцию к повышению, что связано с некоторым ослаблением антициклонального режима погоды, и данная тенденция имеет место, по меньшей мере, на протяжении трех десятилетий. Еще в середине 1990-х годов А.А. Дмитриев (1994) указывал, что в Арктике отмечается статистически значимая тенденция к росту повторяемости циклонических процессов, что позволяет говорить о смене режимов крупномасштабной циркуляции. Климатологами это объясняется зимним усилением зонального переноса, что, с одной стороны, связано с увеличением повторяемости положительных аномалий индекса Северо-Атлантического колебания, а с другой — совпадает с уменьшением активности азиатского максимума (Попова, 2018; Шмакин, Попова, 2006).

Динамичные факторы природно-географической среды. Данная группа факторов требует обязательного учета в краткосрочной перспективе в связи с их ощутимым влиянием на условия функционирования арктических городов в криолитозоне.

Температура многолетнемерзлых пород оценивается на подошве слоя годовых колебаний (10–15 м) и важна для выбора технических особенностей при проведении строительных работ в условиях криолитозоны (Ракита, 1983). Выделяются грунты с высокотемпературной (от -0.1 до -1.5°C) и низкотемпературной ($<-1.5^{\circ}\text{C}$) мерзлотой. Граница между типами мерзлых пород, составляющая -1.5°C принята по ГОСТу 25100-2011¹, где для глинистых отложений она указана в качестве условия, при котором они находятся в твердом состоянии. Для песков мелких и пылеватых, супесей и суглинков она равна соответственно -0.3 , -0.6 и -1.0°C . При таких температурных характеристиках строительство должно вестись с сохранением грунтов в мерзлом состоянии. Грунты с температурой выше указанных значений именуются “пластично-мерзлыми” и, как правило, обладают значительно меньшей мощностью. Строительство на таких грунтах ведется без сохранения льдистых пород, поскольку при таких температурных характеристиках их сложно удержать от деградации.

Температура мерзлых пород — этот тот параметр, от которого в существенной степени зависит характер отклика ландшафтов криолитозоны и их компонентов, обусловленного исходным термическим состоянием пород. По результатам анализа метеоданных и инструментальных наблюдений в криолитозоне разработана серия мелкомасштабных карт на территорию севера России (Павлов, Малкова, 2009), отражающих тренды изменения температуры многолетнемерзлых грунтов в условиях фиксируемых изменений климата.

Мощность сезонного промерзания и оттаивания — результат взаимодействия среднегодовой температуры воздуха, защитных свойств (функций) растительного покрова, а также льдистости и теплофизических свойств поверхностных отложений (прежде всего теплопроводности грунтов), обусловленных составом пород. Отметим, что средозащитные функции растительного покрова не только проявляются в форме теплоизоляции мерзлого слоя органогенными накоплениями, но и выражаются в затратах тепла, расходуемого на испарение в виде транспирации, что обеспечивает охлаждение подстилающей поверхности и стабилизацию геокриологических условий в теплое время года.

Использование данного параметра позволяет ранжировать территории по интенсивности оттаивания в результате их техногенного освоения (строительства сооружений и их эксплуатации).

¹ До 01.01.2013 г. действовал ГОСТ 25100-95, но приведенные в статье температурные характеристики, применительно к условиям строительства, вошли в ГОСТ 25100-2011 без изменения.

Мощность сезонного промерзания предопределяет глубину заложения коммуникаций и фундаментов зданий, которая должна быть ниже отметки, до которой промерзает грунт в зимнее время года. В условиях потепления климата и интенсификации антропогенного воздействия, данный фактор отличается динамичностью, что в основном проявляется в увеличении глубины сезонного протаивания. Это снижает устойчивость свайных конструкций, о чем свидетельствует деформация зданий и сооружений. Косвенным показателем изменения мощности сезонно-талого слоя могут также служить данные об увеличении числа инфекционных заболеваний, как это было в случае со вспышкой сибирской язвы в 2016 г. на территории ЯНАО. Отметим, что в значительной степени развитие этого явления вызвано пастбищной дигрессией, нарушившей теплообмен мерзлых пород с приземной атмосферой.

Таким образом, мощность сезонного промерзания и оттаивания позволяет судить о тепловой инерции мерзлых пород. Максимальные значения глубины сезонного промерзания типичны для районов с наиболее континентальным климатом, где отмечаются самые низкие температуры воздуха и наименьшая мощность снежного покрова, а поверхностные отложения характеризуются преобладанием крупнообломочных отложений, обладающих низкой влагоемкостью.

Характер водоснабжения населенных пунктов. Информация о типе водоснабжения необходима для оценки потенциальных рисков, обусловленных загрязнением поверхностных источников водоснабжения. Данный фактор условно отнесен нами к числу относительно инертных, но он может быть отнесен и к числу динамичных, т.е. способных в краткосрочной перспективе изменить условия функционирования города. К примеру, угольная пыль, отличающаяся повышенной хрупкостью в условиях криолитозоны, повышает концентрацию взвешенных частиц в поверхностных водоемах, что приводит в дальнейшем к невозможности их использования для питьевого водоснабжения (Горшков, 2001). Данная проблема прежде всего актуальна для гг. Анадарь и Певек, где основной источник водоснабжения — водохранилища, а основной энергоноситель — уголь. Этот вопрос значим и для г. Воркута, в котором часть водоснабжения основывается на использовании ресурсов водохранилища. Угольная пыль — один из примеров; возможно влияние и других источников экологической опасности: неконтролируемый сброс дренажных вод, утечка загрязненной воды из естественных нефтешламовых резервуаров, аварии на резервуарах с топливом и т.д.

Сток взвешенных наносов. Данный фактор оценивается через модуль стока взвешенных наносов — показатель, интегрирующий влияние ре-

льефа, органогенных горизонтов почвы, материнской и подстилающих пород и состояния растительного покрова и пр. Модуль стока позволяет оценить степень отклика ландшафтов на трансформацию растительного покрова в связи с увеличением антропогенной нагрузки (Исаченко, 2003). Чем выше степень разреженной биоты на водосборе (косвенно это читается по запасам биомассы), тем выше уязвимость населенных пунктов к неблагоприятным гидрологическим явлениям. Малые водотоки характеризуются значительно более выразительной чувствительностью к антропогенным процессам фрагментации и абитизации территории речного водосбора. Поэтому реки более высокого порядка — это наиболее уязвимая часть речной системы (Горшков, 2001, 2015). Следовательно, мы считаем, что данный показатель корректно индицирует ситуацию на водосборах малых и средних рек, и рекомендуем его использовать для оценки потенциальных гидрологических рисков на территориях криолитозоны, которым присущ положительный баланс наносов. Известно, что хорошо развитый растительный покров ослабляет дестабилизирующую роль водного компонента и в значительной степени регулирует функционирование системы “растительность—почва—зона активного водообмена” (Горшков, 2015). Очевидно, что при техногенном освоении водосборных территорий и нарушении их растительного покрова возрастает потенциал гидрологических рисков. Это необходимо учитывать при росте площадных нарушений ландшафтов, характеризующихся значительной стокоформирующей ролью. Данный вызов требует выделения ресурсов на адаптацию освоенных территорий к учащению неблагоприятных гидрологических явлений.

Биологическая продуктивность ландшафтов. Учитывая средоформирующие и средорегулирующие функции биоты, данный показатель используется как интегральный в оценках устойчивости природной среды (Исаченко, 2003). От биопродукционных характеристик собственно и зависит средозащитный потенциал мерзлотных ландшафтов и скорость их восстановления после антропогенной трансформации. Количественные характеристики биопродуктивности позволяют ранжировать территории по степени уязвимости к внешним воздействиям и их способности к восстановлению. Использование данных показателей представляется весьма необходимым для оценки денудационного потенциала осваиваемой территории (Горшков, 1996), а также потенциальной устойчивости ландшафтов к разным видам антропогенной трансформации, включая аэро-техногенное загрязнение, рекреационное воздействие и затраты на реабилитацию нарушенных территорий.

Согласно анализу данных дистанционного зондирования (Белоновская и др., 2016; Титкова, Виноградова, 2019), за последние десятилетия отмечен тренд, иллюстрирующий рост усредненного значения разностного вегетационного индекса (NDVI). Это свидетельствует об увеличении биологической продуктивности и запасов фитомассы, что, по мнению коллег (Белоновская и др., 2016), происходит в основном за счет расширения площади наиболее продуктивных ландшафтов. Данный тренд является, по-видимому, положительным, поскольку в связи с этим возрастает защитная роль растительного покрова. Это можно кратко продемонстрировать на примере Норильска — одного из крупнейших городов Российской Арктики. В его окрестностях распространена редкостойная лиственничная тайга с примесью ели и березы. В данном случае такие лесные ландшафты имеют не только важное средозащитное, но и вполне существенное рекреационное значение. Увеличение биологической продуктивности для таких экотонных сообществ представляется позитивным процессом, учитывая все разнообразие выполняемых ими экологических функций (от ослабления активности склоновых процессов на участках, перекрытых моренными отложениями, до увеличения площади испаряющей поверхности, снижающей теплоток в толщу грунта). Тот факт, что повышение биопродуктивности ландшафтов сказывается на увеличении затрат тепла на испарение и турбулентный теплообмен (Медведков, 2016; Якубсон и др., 2016), представляется важным для осуществления экологически обоснованного планирования городского пространства с целью управления потоком тепла в мерзлый грунт.

В целом, несмотря на позитивный тренд, отмечено значительное увеличение площадей с трансформированными ландшафтами. Для территории Арктической зоны РФ это увеличение составит более 10% (Белоновская и др., 2016). Это негативный фактор, снижающий тепловую инерцию мерзлых пород и требующий проведения мероприятий по биологической рекультивации, что необходимо для стабилизации геокриологической ситуации на техногенно-трансформированных территориях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшим условием для снижения опасности геоэкологических рисков в арктических городах является наличие актуальной информации о состоянии компонентов анализируемой системы и ключевых факторах их динамики. Для этого необходимо иметь набор индикаторов (см. рис. 1), указывающих на роль факторов, ослабляющих жизнестойкость, и раскрывающих состояние и по-

тенциал развития неблагоприятных геоэкологических процессов на территории города.

В качестве индикаторов, характеризующих степень влияния рассмотренных факторов в динамике, могут быть использованы: *площадная оценка пораженности процессами термоденудации (термокаста и термоэрозии), густота овражной сети (или можно применить более конкретный индикатор, требующий привлечения космических снимков для оценки объема, переработанного термоэрозией, основываясь на данных по глубине и ширине термоэрозионных оврагов), направление и скорость современных вертикальных движений земной коры в увязке с данными о распространении криогенных процессов, модуль стока, повторяемость и продолжительность наводнений, индекс теплового дискомфорта, дефицит биологически активной ультрафиолетовой радиации Солнца, количество эндемических заболеваний, биологическая продуктивность, заболеваемость населения во взаимосвязи с расчетной величиной потенциала загрязнения атмосферы*. Количественные данные по указанным индикаторам включены в картографические материалы, годовые отчеты Росгидромета и статистические ежегодники. Представляется, что данные показатели позволят оценить вклад факторов природно-географической среды в ослабление жизнестойкости арктических городов. Предлагаемые к использованию индикаторы имеют количественное выражение, что позволяет их включать в модели для прогнозирования природно-техногенных процессов и вызванных ими геоэкологических последствий. Полученные результаты представляют интерес для внедрения экосистемного подхода при разработке программ и стратегий социально-экономического развития арктических городов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60088).

FUNDING

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60088).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балдина Е.А., Дедова В.Ю. Выявление и картографирование антропогенных изменений территории по снимкам в тепловом инфракрасном диапазоне (на примере новых территорий Москвы) // Изв. вузов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2016. № 5. С. 92–99.
- Баулин В.В. Влияние тектоники на мерзлотные процессы // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1970. № 6. С. 75–79.

- Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 184 с.
- Белоновская Е.А., Тишков А.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Морозова О.В., Покровская И.В., Царевская Н.Г., Тертицкий Г.М. "Позеленение" Российской Арктики и современные тренды изменения ее биоты // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 3. С. 28–39.
- Бурцева А.В., Шарова Е.Н., Оман С. Жизнестойкость городов Кольского Севера в пространственном, временном и антропологических измерениях // Вестн. археологии, антропологии и этнографии. 2020. № 3. С. 191–200.
- Виноградова В.В. Универсальный индекс теплового комфорта на территории России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 2. С. 3–19.
- Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: МГУ, 2001. 262 с.
- Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 214 с.
- Галаганов О.Н., Горшков В.Л., Гусева Т.В., Розенберг Н.К., Передерин В.П., Щербакова Н.В. Современные движения земной коры Ладого-Онежского региона по данным спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 130–136.
- Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швеиц / отв. ред. Н.П. Лаверов. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
- Горшков С.П. Концептуальные основы геоэкологии. М.: Желдориздат, 2001. 592 с.
- Горшков С.П. Ландшафтно-геоэкологическая оценка состояний окружающей среды // Современные изменения в литосфере под влиянием природных и антропогенных факторов / под ред. В.И. Осипова и др. М.: Недра, 1996. С. 140–156.
- Горшков С.П. Организованность биосферы и устойчивое развитие // Жизнь Земли. 2015. Т. 37. С. 62–84.
- Дмитриев А.А. Изменчивость атмосферных процессов в Арктике и ее учет в долгосрочных прогнозах. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 208 с.
- Замятина Н.Ю., Медведков А.А., Поляченко А.Е., Шамало И.А. Жизнестойкость арктических городов: анализ подходов // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 3. С. 481–505.
- Исаченко А.Г. Введение в экологическую географию. СПб.: СПбГУ, 2003. 192 с.
- Карапетян Т.А., Доршакова Н.В., Никифорова Н.А. О необходимости изучения формирования патологии на северных территориях // Сб. науч. тр. II Российского симпозиума с международным участием "Световой режим, старение и рак". Петро-заводск: ПетроПресс, 2013. С. 141–148.
- Клюев Н.Н. Качество атмосферного воздуха российских городов в 1991–2016 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 1. С. 14–23.
- Крайнов С.Р., Закутин В.П. Геохимико-экологическое состояние подземных вод России (причины и тенденции изменения химического состава подземных вод) // Геохимия. 1994. № 3. С. 32–39.
- Лихачева Э.А., Некрасова Л.А., Чеснокова И.В. Ресурсные города в зоне многолетнемерзлых пород (Эколого-геоморфологические проблемы и пути решения) // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Серия: Естественные науки. 2018. Т. 42. № 4. С. 497–506.
- Макаров В.Н. Эколого-геохимическая оценка техногенного воздействия на окружающую среду Якутска // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 45–48.
- Медведков А.А. Арктическая зона России: экологические угрозы в условиях климатических изменений // Экологические последствия чрезвычайных ситуаций: актуальные проблемы и пути их решения. М.: ВНИИ ГОЧС, 2017. С. 17–22.
- Медведков А.А. Картографирование криогенных ландшафтов на основе анализа тепловых снимков / ИнтерКарто / ИнтерГИС. 2016. Т. 22. № 1. С. 380–384.
- Медведков А.А. Климатогенная динамика ландшафтов сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 122–129.
- Механизмы устойчивости геосистем. М.: Наука, 1998. 208 с.
- Национальный атлас России. Природа. Экология. Т. 2. М.: Роскартография, 2007. 496 с.
- Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры. М.: Наука, 1977. 240 с.
- Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на Севере России // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 32–39.
- Певзнер В.С., Ермаков Ю.Н. Экологические аспекты карты геохимической специализации структурно-формационных комплексов России // Прикладная геохимия. Вып. 2. Экологическая геохимия. М.: ИМГРЭ, 2001. С. 190–197.
- Поляк-Блажи М. Роль железа в канцерогенезе, антиканцерогенный эффект соединений железа. Ч. 1. Связь железа с канцерогенезом // Микроэлементы в медицине. 2002. Т. 3. № 1. С. 20–28.
- Попова В.В. Современные изменения климата на Севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 1. С. 84–111.
- Природно-климатические условия и социально-географическое пространство России / под ред. А.Н. Золотокрылина, В.В. Виноградовой, О.Б. Глезер. М.: ИГ РАН, 2018. 156 с.
- Ракита С.А. Природа и хозяйственное освоение Севера. М.: МГУ, 1983. 190 с.
- Ракитина С.А., Климович М.В. Климатическое районирование СССР для целей градостроительства // Матер. конф. "Климат–город–человек". М.: Полиграфист, 1974. С. 94–98.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Современные проблемы дистанци-

- онного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323.
- Шестова Г.В., Иванова Т.М., Ливанова Г.А., Сизова К.В. Токсические эффекты марганца как фактор риска для здоровья населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2014. Т. 50. № 4. С. 59–65.
- Шмакин А.Б., Попова В.В. Динамика климатических экстремумов в Северной Евразии в конце XX века // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. № 2. С. 157–166.
- Экологический атлас России. М.: Феория, 2017. 510 с.
- Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / под ред. Н.С. Касимова, А.В. Кислова. М.: Наука, 2011. 496 с.
- Якубсон К.И., Корниенко С.Г., Разумов С.О., Дубровин В.А., Крицук Л.Н., Ястреба Н.В. Геоиндикаторы изменения окружающей среды в районах интенсивного освоения нефтегазовых месторождений и методы их оценки // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2012. № 2 (6). С. 1–22.
- ArcticDEM Release 7. <https://www.pgc.umn.edu/news/arcticdem-release-7/> (дата обращения 20.04.2020).
- Building Urban Resilience: Principles, Tools, and Practice. Directions in development: environment and sustainable development / A. Jha, T. Miner, Z. Stanton-Geddes (Eds.). Washington: World Bank, 2013. 206 p.
- Fiala D., Havenith G., Brode P., Kampmann B., Jendritzky G. UTCI-Fiala multi-node model human heat transfer and thermal comfort // Int. J. Biometeorol. 2012. V. 56. P. 429–441.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate change 2008. The AR4 Sintesis Rep. Cambridge Univ. Press, 2008. 383 p.
- Medvedkov A.A. The Kets ethnos and its “feeding landscape”: ecological-geographical and socio-ecological problems under globalization and changing climate // Geogr. Environ. Sustain. 2013. V. 6. № 3. P. 108–118.
- NSIDC – Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. <https://nsidc.org/fgdc/maps/> (дата обращения 29.04.2020).
- Osipov V.I., Aksyutin O.E., Ishkov A.G., Grachev V.A., Sergeev D.O. Adaptation – an Important Technology in the Development of Russia’s Subarctic Territories // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019. V. 89. 1. P. 65–71.
- Reily S.J., DeGloria S.D., Elliot R.A. Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity // Int. J. of Sci. 1999. V. 5. P. 23–27.
- Streletskiy D.A., Suter L.J., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Env. Res. Let. 2019. V. 14. № 2. 025003.

Geoenvironmental Factors of Resilience of Arctic Cities in the Cryolithozone: Theoretical Approaches to the Study

A. A. Medvedkov*

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

**e-mail: a-medvedkov@bk.ru*

Factors of the natural and geographical environment indirectly affecting the economic space structure, the cost of living, and the development conditions of any Arctic city in the cryolithozone are considered. Three groups of factors are identified based on modern ideas about the characteristic time of changes in various natural and environmental components, and taking into account the scale of transformational consequences: inert (territory biogeochemical specialization, nature of permafrost distribution for the next 25–30 years), relatively inert/poorly changing (territory dissection, direction, and speed of Earth’s crust vertical movements, permafrost iciness, thermal discomfort, biologically active ultraviolet radiation deficit, atmospheric pressure variability, the atmosphere self-purification potential) and dynamic (water supply, average annual temperature of permafrost at the base of the layer of annual fluctuations, capacity of the layer of seasonal freezing and thawing, runoff of suspended sediment, subject to the development of small or medium rivers’ water catchment, biological productivity of landscapes). These factors affect the weakening of the resilience of Arctic cities, and their importance is enhanced by rapid climate changes and changing intensity of anthropogenic load. To assess the impact of these factors on the Arctic cities development and comparison of their values in the dynamics of the proposed indicators—areal assessment of the thermodenudation processes prevalence, gully network density, runoff, frequency and duration of flooding, changes in indices of thermal comfort, number of endemic diseases and their dynamics, dynamics of population morbidity in conjunction with the calculated value of the air pollution potential, biological productivity of landscapes and tendencies of its change in relation to the dynamics of indicators of the structure of the underlying surface’s heat balance. These indicators can be a component of the developed index of Arctic cities’ resilience. The analyzed factors are considered in the concept of resilience, which is used as a base for analyzing systems that develop under increased environmental risks conditions.

Keywords: Arctic, Far North, urban settlements, extreme cities, permafrost landscapes, climate change, environmental indicators, planning horizons, resistance

REFERENCES

- Baldina E.A., Dedova V.Yu. Detection and mapping of human-induced changes on territory using thermal infrared images: case study of the new areas of Moscow. *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved., Geodeziya i Aerofotos'emka*, 2016, no. 5, pp. 92–99. (In Russ.).
- Baulin V.V. Influence of tectonics on permafrost processes. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1970, no. 6, pp. 75–79. (In Russ.).
- Belonovskaya E.A., Tishkov A.A., Vaisfeld M.A., Glazov P.M., Krenke (junior) A.N., Morozova O.V., Pokrovskaya I.V., Tsarevskaya N.G., Tertitskii G.M. “Greening” of the Russian Arctic and the modern trends of transformation of its biota. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 3, pp. 28–39. (In Russ.). doi 10.15356/0373-2444-2016-3-28-39
- Bezuglaya E.Yu. *Meteorologicheskii potentsial i klimaticheskie osobennosti zagryazneniya vozdukhа gorodov* [Meteorological Potential and Climatic Features of Urban Air Pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1980. 184 p.
- Brown J., Ferrians O., Heginbottom J.A., Melnikov E. *Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions*, Version 2. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2002. Available at: <https://nsidc.org/data/ggd318> (accessed: 29.04.2020). doi 10.7265/skbg-kf16
- Building Urban Resilience: Principles, Tools, and Practice. Directions in Development: Environment and Sustainable Development*. Jha A., Miner T., Stanton-Geddes Z., Eds. Washington: World Bank, 2013. 206 p.
- Burtseva A.V., Sharova E.N., Oman S. Resilience of the Kola North cities in spatial, temporal and anthropological dimensions. *Vestn. Arkheologii, Antropologii i Etnologii*, 2020, vol. 50, no. 3, pp. 191–200. (In Russ.). doi 10.20874/2071-0437-2020-50-3-17
- Dmitriev A.A. *Izmenchivost' atmosferynykh protsessov v Arktike i ee uchet v dolgosrochnykh prognozach* [Variability of Atmospheric Processes in the Arctic and Its Consideration in Long-Term Forecasts]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1994. 208 p.
- Ekologicheskii atlas Rossii* [Ecological Atlas of Russia]. Moscow: Feoriya Publ., 2017. 510 p.
- Ekologo-geograficheskie posledstviya global'nogo potepeniya klimata 21 veka na Vostochno-Evropeiskoi ravnine i v Zapadnoi Sibiri* [Ecological and Geographical Consequences of Global Warming of the 21st Century on the East European Plain and in Western Siberia]. Kasimov N.S., Kislov A.V., Eds. Moscow: Nauka Publ., 2011. 496 p.
- Fiala D., Havenith G., Brode P., Kampmann B., Jendritzky G. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int. J. Biometeorol.*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 429–441.
- Galaganov O.N., Gorshkov V.L., Guseva T.V., Rozenberg N.K., Perederin V.P., Shcherbakova N.V. Recent crustal motion of Ladoga-Onega region revealed from satellite and ground measurements. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosm.*, 2011, vol. 8, no. 2, pp. 130–136. (In Russ.).
- Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of Groundwater. Theoretical, Applied and Environmental Aspects]. Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M., Laverov N.P., Eds. Moscow: TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p.
- Gorshkov S.P. *Kontseptual'nye osnovy geoekologii* [Conceptual Foundations of Geoecology]. Moscow: Zheldorizdat Publ., 2001. 592 p.
- Gorshkov S.P. Landscape-geoecological assessment of environmental conditions. In *Sovremennye izmeneniya v litosfere pod vliyaniem prirodnykh i antropogennykh faktorov* [Modern Changes in the Lithosphere under the Influence of Natural and Anthropogenic Factors]. Osipov V.I., Ed. Moscow: Nedra Publ., 1996, pp. 140–156. (In Russ.).
- Gorshkov S.P. Organized biosphere and sustainable development. *Zhizn' Zemli*, 2015, vol. 37, pp. 62–84. (In Russ.).
- IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri R.K., Reisinger A., Eds. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007. 104 p.
- Isachenko A.G. *Vvedenie v ekologicheskuyu geografiyu* [Introduction to Ecological Geography]. St. Petersburg: SPbGU, 2003. 192 p.
- Karapetyan T.A., Dorshakova N.V., Nikiforova N.A. About the need to study the formation of pathology in the northern territories. In *Sb. nauchn. tr. II Ross. simp. s mezhdunar. uchastiem “Svetovoi rezhim, starenie i rak”* [Light Mode, Aging and Cancer. Coll. Sci. Works II Russ. Symp.]. Petrozavodsk: PetroPress, 2013, pp. 141–148. (In Russ.).
- Klyuev N.N. The quality of atmospheric air of Russian cities in 1991–2016. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 1, pp. 14–23. (In Russ.). doi 10.31857/S2587-55662019114-23
- Krainov S.R., Zakutin V.P. Geochemical and ecological state of groundwater in Russia (reasons and trends of changes in the chemical composition of groundwater). *Geokhimiya*, 1994, no. 3, pp. 32–39. (In Russ.).
- Likhacheva E.A., Nekrasova L.A., Chesnokova I.V. Resource towns in the permafrost zone (Ecological and geomorphological problems and solutions). *Nauch. Vedomosti Belgorod. Gos. Univ., Ser: Estestvennye Nauki*, 2018, vol. 42, no. 4, pp. 497–506. (In Russ.). doi 10.18413/2075-4671-2018-42-4-497-506
- Makarov V.N. Ecological and geochemical assessment of the technogenic impact on the environment of Yakutsk. *Geogr. Priir. Resur.*, 2010, no. 1, pp. 45–48. (In Russ.).
- Medvedkov A.A. Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the Middle Yenisei river basin. *Geogr. Priir. Resur.*, 2018, no. 4, pp. 122–129. (In Russ.). doi 10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(122-129)
- Medvedkov A.A. Mapping of permafrost landscapes based on the analysis of thermal images. *InterCarto/InterGIS*,

- 2016, vol. 22, no. 1, pp. 380–384. (In Russ.). doi 10.24057/2414-9179-2016-1-22-380-384
- Medvedkov A.A. The Kets ethnos and its “feeding landscape”: ecological-geographical and socio-ecological problems under globalization and changing climate. *Geogr. Environ. Sustain.*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 108–118. doi 10.24057/2071-9388-2013-6-3-108-118
- Medvedkov A.A. The Russian Arctic: environmental threats in the context of climate change. In *Ekologicheskie posledstviya chrezvychaynykh situatsii: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya* [Environmental Consequences of Emergencies: Current Problems and Ways to Solve Them]. Moscow: VNII GO CHS, 2017, pp. 17–22. (In Russ.).
- Mekhanizmy ustoichivosti geosistem* [Mechanisms of Stability of Geosystems]. Moscow: Nauka Publ., 1998. 208 p.
- Natsional'nyi atlas Rossii. Priroda. Ekologiya* [National Atlas of Russia. Nature. Ecology]. Vol. 2. Moscow: Roskartografiya Publ., 2007. 496 p.
- Nikonov A.A. *Golotsenovyie i sovremennyye dvizheniya zemnoi kory* [Holocene and Modern Crustal Movements]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 240 p.
- Osipov V.I., Aksyutin O.E., Ishkov A.G., Grachev V.A., Sergeev D.O. Adaptation — an important technology in the development of Russia's subarctic territories. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2019, vol. 89, no. 1, pp. 65–71. doi 10.1134/S1019331619010064
- Pavlov A.V., Malkova G.V. Small-scale mapping of trends in modern soil temperature changes in the North of Russia. *Kriosfera Zemli*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 32–39. (In Russ.).
- Pevzner V.S., Ermakov Yu.N. Ecological aspects of the map of geochemical specialization of structural-formational complexes in Russia. In *Prikladnaya geokhimiya* [Applied Geochemistry]. Vol. 2: *Ekologicheskaya geokhimiya* [Environmental Geochemistry]. Moscow: IMGRE, 2001, pp. 190–197. (In Russ.).
- Porter C., Morin P., Howat I. et al. *ArcticDEM, Release 7*. Harvard Dataverse, VI. 2018. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/news/arcticdem-release-7/> (accessed: 20.04.2020). doi 10.7910/DVN/OHHUKH
- Polyak-Blazhi M. The role of iron in carcinogenesis, anti-carcinogenic effect of iron compounds. Part 1. Connection of iron with carcinogenesis. *Mikroelementy v Meditsine*, 2002, vol. 3, no. 1, pp. 20–28. (In Russ.).
- Popova V.V. Present-day changes in climate in the North of Eurasia as a manifestation of variation of the large-scale atmospheric circulation. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2018, vol. 1, pp. 84–111. (In Russ.). doi 10.21513/2410-8758-2018-1-84-111
- Prirodno-klimaticheskie usloviya i sotsial'no-geograficheskoe prostranstvo Rossii* [Natural and Climatic Conditions and Socio-geographical Space of Russia]. Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V., Glezer O.B., Eds. Moscow: Inst. Geogr. RAN, 2018. 156 p.
- Rakita S.A. *Priroda i khozyaistvennoe osvoenie Severa* [Nature and Economic Development of the North]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1983. 190 p.
- Rakitina S.A., Klimovich M.V. Climatic zoning of the USSR for the purposes of urban planning. In *Klimat-gorod-chelovek* [Climate-City-Human]. Moscow: Poligrafist Publ., 1974, pp. 94–98. (In Russ.).
- Reily S.J., DeGloria S.D., Elliot R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain J. Sci.*, 1999, vol. 5, pp. 23–27.
- Shestova G.V., Ivanova T.M., Livanova G.A., Sizova K.V. Manganese toxic properties and manganese toxicity as a threat to public health. *Meditsina Ekstremal'nykh Situatsii*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 59–65. (In Russ.).
- Shmakina A.B., Popova V.V. Dynamics of climatic extremes in Northern Eurasia at the end of the 20th century. *Izv. Akad. Nauk. Fizika Atmosfery i Okeana*, 2006, no. 2, pp. 157–166. (In Russ.).
- Streletskiy D.A., Suter L.J., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, no. 2, 025003.
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics. *Sovrem. Probl. Distanttsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosm.*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 310–323. (In Russ.). doi 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323
- Vinogradova V.V. Universal thermal climate index in Russia. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 2, pp. 3–19. (In Russ.). doi 10.31857/S2587-5566201923-19
- Voskresenskii K.S. *Sovremennyye rel'efoobrazuyushchie protsessy na ravninakh Severa Rossii* [Modern Relief-forming Processes in the Plains of the North of Russia]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2001. 262 p.
- Vtyurin B.I. *Podzemnye l'dy SSSR* [Underground Ice in the USSR]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 214 p.
- Yakubson K.I., Kornienko S.G., Razumov S.O., Dubrovin V.A., Kritsuk L.N., Yastreba N.V. Geoindicators of environmental changes in areas of intensive development of oil and gas fields and methods for their assessment. *Georesursy, Geoenergetika, Geopolitika*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 1–22. (In Russ.).
- Zamyatina N.Yu., Medvedkov A.A., Polyachenko A.E., Shamalo I.A. Resilience of Arctic cities: An analysis of the approaches. *Vestn. S.-Peterb. Univ., Nauki o Zemle*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 481–505. (In Russ.). doi 10.21638/spbu07.2020.305