

## МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ГЕОСИСТЕМАХ «ПРОМЫШЛЕННЫЙ ОБЪЕКТ – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

*И.В. Ядрихинский<sup>1</sup>, Т.Р. Егорова<sup>2\*</sup>, В.В. Власенко<sup>3</sup>,  
С.Р. Егорова<sup>1</sup>, А.А. Денисова<sup>1</sup>, Д.Г. Захаров<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «Алмазы Анабара», Якутск, Российская Федерация,

<sup>3</sup>Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства  
Республики Саха (Якутия), Якутск, Российская Федерация

\*Tuyaruslanovna@mail.ru

### Аннотация

В настоящее время с развитием горнодобывающей отрасли и с ростом потребления топлива на Арктическом севере Якутии, обладающей значительным минеральным запасом в стране, большое значение имеют аспекты, связанные с повышением экологических требований к добывающим компаниям, поиском баланса между экономикой и сохранением природной среды. А также в условиях тенденции потепления климата на большей части криолитозоны России особую важность приобретают мероприятия, направленные на изучение и развитие системы геотехнического мониторинга на промышленных и гражданских объектах в районах распространения многолетнемерзлых пород. Стоит отметить, что хранение нефтепродуктов в арктических районах осуществляется в резервуарных парках, возводимых на грунтовом основании. Поэтому изучение этих проблем недропользователями имеет особую важность для обеспечения устойчивого социально-экономического и инфраструктурного развития территории в соответствии с требованиями промышленной и экологической безопасности.

В статье представлены методы по использованию естественных научных методов в процессе исследований в области инженерной защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов. Теоретические исследования фундаментального масштаба часто основаны на опосредованном, мысленном изучении процессов и явлений (синергетически взаимосвязанных природно-технических геосистем). При этом практическое взаимодействие с непосредственно исследуемыми объектами (конкретными объектами промышленной инфраструктуры) может отсутствовать.

На основе анализов теоретических методов установлены и выявлены общие принципы инженерной защиты окружающей среды в направлении минимизации интегральных потерь неживой и живой природы. Поставлены новые, ранее неизвестные или не решенные задачи, имеющие важное прикладное значение. Проведена качественная и количественная оценка ранее полученных прецедентов по аналогичным методологическим направлениям изучаемых проблем. Разработана принципиально новая система понимания явлений, механизмов и процессов экологически безопасного природопользования на промышленно-осваиваемых территориях.

**Ключевые слова:** рациональное природопользование, природно-технические геосистемы, геотехнический мониторинг, геоэкология, инженерная защита окружающей среды, промышленный объект, эксплуатация, экологическая безопасность, экотоп, жизненный цикл.

**Для цитирования:** Ядрихинский И.В., Егорова Т.Р., Власенко В.В., Егорова С.Р., Денисова А.А., Захаров Д.Г. Механизмы взаимодействия в природно-технических геосистемах «промышленный объект-окружающая среда». *Вестник СВФУ*. 2026;(1):74-84. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-74-84

## INTERACTIONS MECHANISMS IN NATURAL-TECHNICAL GEOSYSTEMS “INDUSTRIAL FACILITY – ENVIRONMENT”

Ivan V. Yadrikhinsky<sup>1</sup>, Tuyaara R. Egorova<sup>2\*</sup>, V.V. Vlasenko<sup>3</sup>, Sargylaana R. Egorova<sup>1</sup>,  
Anastasia A. Denisova<sup>1</sup>, David G. Zakharov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Almazy Anabara JSC, Yakutsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Sakha Republic (Yakutia),  
Yakutsk, Russian Federation

\*Tuyaruslanovna@mail.ru

### Abstract

With the development of the mining industry and growing fuel consumption in the Arctic north of Yakutia, which boasts significant mineral reserves, increasing environmental requirements for mining companies and finding a balance between economics and environmental conservation are increasingly important. Furthermore, given the trend of global warming in Russia's permafrost zone, measures aimed at studying and developing geotechnical monitoring systems at industrial and civil facilities in permafrost areas are particularly important. It is worth noting that petroleum products in Arctic regions are stored in tank farms constructed on ground foundations. Therefore, studying these issues by subsoil users is important to ensure sustainable socio-economic and infrastructural development of the territory in accordance with industrial and environmental safety requirements.

This article presents methods for using natural sciences in research in the field of environmental engineering and the rational resources.

Fundamental theoretical research is often based on an indirect, conceptual study of processes and phenomena (interconnected natural and technical geosystems). However, practical interaction with the objects being directly studied (industrial infrastructure facilities) may be absent.

Based on analyses of theoretical methods, general principles of environmental engineering aimed at minimizing integral losses of inanimate and animate nature were established and identified. New, previously unknown or unsolved problems of significant practical significance were posed. A qualitative and quantitative assessment of previously obtained precedents in methodological areas of the problems under study was conducted. A fundamentally new system for understanding the phenomena, mechanisms, and processes of environmentally sound nature management in industrially developed areas was developed.

**Keywords:** rational use of natural resources, natural-technical geosystems, geotechnical monitoring, geocology, environmental engineering, industrial facility, operation, environmental safety, ecotope, life cycle

**For citation:** Yadrikhinsky I.V., Egorova T.R., Vlasenko V.V., Egorova S.R., Denisova A.A., Zakharov D. G. Interactions mechanisms in natural-technical geosystems “industrial facility – environment”. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(1):74-84. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-74-84

### Введение

Общий принцип инженерной защиты окружающей среды в направлении минимизации интегральных потерь неживой и живой природы базируется на физико-математических аспектах исследования механизмов взаимодействия в природно-технических геосистемах (ПТГ) «промышленный объект – окружающая среда» [1]. При этом ущерб, наносимый окружающей среде (ОС) в локальном, региональном или глобальном масштабе может быть формализован следующим образом:

- абсолютно невозполнимые потери, связанные с уничтожением биологических популяций (растительного и животного вида) или необратимого изменения биогеоценозов за пределами границ самовосстановления;

- качественные потери неживой природы в первоначальных количественных пропорциях (ухудшение плодородной структуры почв, изменение гидрогеологического режима течений, деградации почв в наиболее экологически уязвимых районах Крайнего Севера;
- обратимые потери живой природы в границах самовосстанавливаемости или экологической реконструкции по результатам геотехнического мониторинга [2].

Анализируя механизм формирования экологических потерь по компонентам ОС целесообразно рассматривать три стадии функционирования ПТГ [3]. На первой стадии развития процесса происходит нормативно допустимое использование природных ресурсов, характеризующее окончание активной фазы производственно-технологического цикла. Далее процесс переходит в состояние относительной инженерно-экологической устойчивости в пределах сохранения баланса биосферы в границах её естественной саморегенерации. Третья стадия характеризует нарастающую динамику потери экологической устойчивости процесса функционирования ПТГ по двум возможным сценариям – естественной биоэкологической адаптации ОС и комплексной инженерно-экологической реабилитации ПТГ, создающей наибольший эффект восстановления природной среды и объектов промышленно-техногенной инфраструктуры.

**Материалы и методы исследования**

Оценка экологического равновесия промышленно осваиваемой территории опирается на глубокий количественный анализ многофункциональных ПТГ по всем трем стадиям экологических потерь. Объективной характеристикой равновесия ПТГ с точки зрения инженерной защиты ОС может служить вектор экологических потерь  $\bar{R}$ , ориентированный в направлении конкретного компонента природы. При этом длина вектора пропорциональна смещению, оцениваемому коэффициентом репрезентативности, характеризующему экологическую асимметрию  $\Delta$ , по компонентам экотопа (атмосферы – А, гидросферы – Г, литосферы – Л) и биоценоза (флоры  $\Phi_l$ , фауны  $\Phi_n$ ), т.е. [4]:

$$\bar{R} \approx \Delta_{\mathcal{E}}(\Delta_{A,G,L}; \Delta_{\Phi_l, \Phi_n}) \tag{1}$$

В этом случае теоретической идеализацией будет служить такая нормативно обеспеченная экологически устойчивая ПТГ, для которой общие потери ОС минимизированы до приемлемого биосферой уровня, или даже равны нулю:

$$\bar{R} = \min_{\substack{\Delta_{\mathcal{E}} \left( \sum_i^n \Delta_{A,G,L}; \sum_i^n \Delta_{\Phi_l, \Phi_n} \right) \\ \bar{R} = 0; \Delta_{\mathcal{E}}}} \tag{2}$$

Для реальной ПТГ вектор потенциальных потерь в ОС функционально характеризует качество инженерных изысканий на предпроектном этапе, а также качество работ строительного и производственно-технологического цикла. Вектор фактических потерь в ОС является функцией эксплуатационной надежности и экологической безопасности должна быть установлена регламентированная норма, являющаяся границей предельно допустимых воздействий на ОС. Предельно допустимые воздействия на этапах жизненного цикла функционирования промышленного объекта (строительство на всех этапах производства работ: земляных, сварочно-монтажных, изоляционно-укладочных и т.д.; эксплуатация) требуют инженерно-экологического обоснования по основным направлениям обеспечения устойчивого баланса биосферы:

- а) локального экологического прессинга (или интенсивности местных потерь конкретного вида);
- б) возможности развития необратимых смещений экологически устойчивого равновесия по интенсивности возникновения потерь в ОС –  $dR/dt$ , или вероятности повышения экологического риска  $P(\bar{R}, \Delta_{\mathcal{E}}) \leq 1$  [4];

в) самокомпенсационного или деградационного характера экологического противодействия со стороны биосферы на техногенное воздействие промышленного объекта.

Одним из основных аспектов всестороннего инженерно-экологического анализа реальной антропогенной обстановки в конкретной ПТГ является глубокое исследование всех возможных источников вредных воздействий на компоненты биогеоценоза.



Рис. 1. Классификация источников негативного влияния на окружающую среду

Fig.1. Classification of sources of negative impact on the environment

На рис.1 представлена обобщённая классификация источников негативного влияния на окружающую среду, которая отражает реальную картину взаимодействия объектов промышленной и социальной инфраструктуры многоотраслевого природно-территориального комплекса Якутии за период наблюдения 2011–2022 гг. Интенсивное использование природных ресурсов, особенно в районах Крайнего Севера, создаёт всё более высокий риск превышения антропогенных нагрузок восстановительного потенциала биосферы региона.

Регионально-экологический подход к оценке последствий взаимодействия промышленных объектов с ОС базируется на результатах статистического анализа многофакторной ретроспективной информации, данных геотехнического и экологического мониторинга, а также многосторонних экспертных исследованиях [12, 13].

### Результаты и обсуждение

Исследование механизмов взаимодействия ПТГ на региональном и межрегиональном уровнях имеет цель создания комплексной инженерной защиты ОС с учётом зональных факторов географических, инженерно-геологических, биофизикохимических условий трансформирования природной среды под действием антропогенных процессов в границах исследуемой территории. Поэтому с позиции системного анализа экологическая защита природно-территориального комплекса подразумевает, прежде всего, создание условий, необходимых для реализации механизмов естественного саморегулирования и самовосстановления природной среды путём антропогенных ограничений регионального и межрегионального энерго-массопереноса между компонентами биогеоценоза (атмосферы – *A*, гидросферы – *G*, литосферы – *L*, биосферы – *B*).

С позиции рассмотренного в данной статье закона о резонансных эффектах антропогенно связанных сопредельных территорий, процессы энерго-массопереноса, инициируемые техногенными факторами, обуславливают экологически объективный принцип причинности взаимовлияния компонентов биогеоценоза. Изучение этого принципа экологической причинности имеет фундаментальное значение, поскольку требует глубокого исследования пространственно-временных границ физико-химического взаимодействия и взаимосвязи потоков техногенного энерго-массопереноса.

Решение этой фундаментальной задачи в соответствии с законом, сформулированным Ядрихинским И.В. [5], потребовало в качестве необходимого исходного условия кардинального пересмотра и совершенствования естественно-научного содержания важнейшей составляющей ветви общей экологии-геоэкологии. В соответствии с общепринятым определением [6], геоэкология – это «изучение геосфер, их динамики и взаимодействия, геофизических условий жизни, факторов неживой окружающей среды, действующей на организм».

К сожалению, такое определение понятия геоэкологии не отвечает современным требованиям организации исследований по комплексной защите окружающей среды в условиях глобальной трансформации биосферы Земли в био-техносферу. Во-первых, понятийный аппарат традиционно рассматриваемой геоэкологии учитывает только геофизические условия жизни по факторам неживой ОС со стороны геосфер ( $A, G, L$ ). Во-вторых, не учитываются механизмы реальной синергетики в направлении самоорганизации, возникновения, устойчивости и деградации различных структур биосферы ( $B$  – флоры и фауны). В-третьих, по мере неуправляемого роста антропогенного влияния на географическую среду и депрессивных процессов трансформирования ландшафтной оболочки Земли увеличивается зона взаимопроникновения (эпигеосферы) и техногенно выраженного взаимодействия по биофизикохимическим свойствам всех компонентов биогеоценоза:

$$A \leftrightarrow G \leftrightarrow L \leftrightarrow B,$$

что в итоге создает экологически опасные резонансные эффекты, требующие адекватной инженерной защиты природной среды. И, наконец геоэкология на фундаментальном уровне наделена естественно-научной методологией исследования необходимых географических и достаточных инженерно-экологических критериев, и методов защиты природы в локальном и глобальном измерении.

На рис. 2 представлена структурно-функциональная характеристика фундаментальной геоэкологии, отражающая принципиальные направления развития этой усовершенствованной научной дисциплины.

Процесс функционирования ПТГ, «промышленный объект – окружающая природная среда», следует рассматривать в развитии двух диалектически взаимосвязанных противоположных подпроцессов:

- естественного компенсационного (за счёт механизмов саморегенерации популяций биосферы);
- техногенного подавления компенсационных механизмов саморегенерации компонентов экотопа и биоценоза под действием промышленного антропогенеза.

Первый подпроцесс характеризует потенциал жизнеспособности естественной природной экосистемы по критериям её сопротивляемости и приспособляемости (адаптируемости) потокам антропогенной деградации. Второй подпроцесс характеризуется техногенными факторами экологически экстремальных рисков по компонентам экотопа и биоценоза, конструктивно-технологической надёжностью и безопасностью по всем стадиям жизненного цикла промышленного объекта (изыскания, проектирование, строительство, испытания, эксплуатация).

В таком контексте исследования процесса ПТГ, накапливающего локальные, непрерывно появляющиеся во времени изменения  $\Delta_g$ , можно рассматривать как систему, обладающую закономерным снижением экологической устойчивости по отношению к внешним техногенным

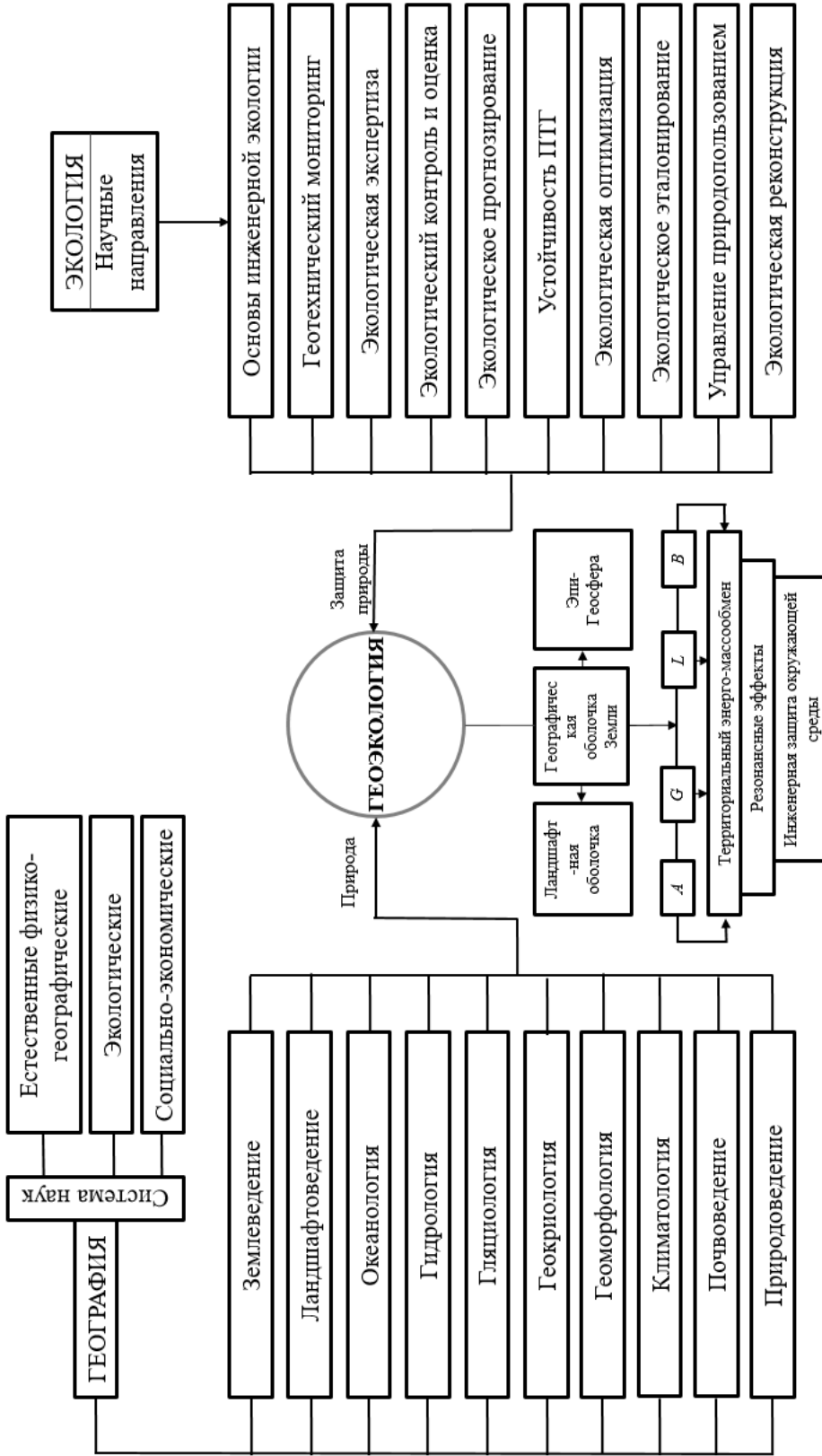


Рис. 2. Структурно-функциональная характеристика фундаментальной геоэкологии (география & экология)  
 Fig. 2. Structural and functional characteristics of fundamental geocology (geography & ecology)

воздействиям. Условные вероятности перехода экосистемы в процессе функционирования ПТГ могут рассматриваться по различным стадиям состояния – от начальной (без явного накопления антропогенно негативных изменений) через промежуточные (с незначительными остаточными антропогенными изменениями) [7, 8], к переходу экосистемы в предельное состояние (с полным нарушением равновесия). При этом вероятности перехода экосистемы из одного состояния в другое зависят от одного  $\Delta_{g_i}$ , или группы локальных изменений  $\sum_{i=1}^n \Delta_{g_i}$ , исходя из характера (интенсивности и мощности) факторов техногенного воздействия.

В общем случае задачи по определению условных вероятностей перехода экосистемы из одного состояния в другое методически решаются на основании теоремы умножения вероятностей. С точки зрения взаимной обусловленности распределений накапливающихся антропогенных изменений и времени нахождения экосистемы в равновесии физический смысл экологической безопасности состоит в последовательном суммировании времён перехода системы от начального равновесного состояния через промежуточные условно равновесные состояния к предельному, характеризующемуся критическим уровнем накопления антропогенных изменений [8, 9]:

$$t_{np} = \sum_i^n t_{i(g_i)} = t_{(g_1)} + t_{(g_2)} + \dots + t_{(g_n)} \quad (3)$$

Любому интервалу времени  $\Delta t = t_{(g_i)} - t_{(g_{i-1})}$  соответствуют приращения антропогенных изменений в экосистеме в целом  $\mathcal{E}_\Sigma$  или в конкретных компонентах экотопа ( $A, G, L$ ) и биоценоза  $B(\Phi_n, \Phi_n)$ , а также вероятности того, что такое накопление изменений произойдёт в рассматриваемом интервале  $\Delta t$  [9]. В этом случае имеем функционально связанную последовательность  $\Delta t \rightarrow \Delta \mathcal{E}_\Sigma \rightarrow \Delta P$ , которую характеризуют антропогенные изменения в рассматриваемой экосистеме в границах ПТГ:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= P(t + \Delta t) - P(t) \\ \Delta \mathcal{E}_\Sigma &= \mathcal{E}_\Sigma(t + \Delta t) - \mathcal{E}_\Sigma(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

На рис. 3 отражен физический смысл функциональных переходов ПТГ по стадиям антропогенных изменений в соответствии с формулами (1), (2) [10-11]. Поскольку показатели состояния ПТГ  $P(t)$  и  $\mathcal{E}_\Sigma(t)$  обуславливают общую тенденцию изменений, происходящих в экосистеме  $\mathcal{E}_\Sigma[(A, G, L); (B)]$ , то для оценки устойчивого функционирования её в составе ПТГ необходимо учитывать интенсивность техногенного влияния  $V_g$  на природные компоненты со стороны промышленных объектов (являющихся источниками техногенеза). Учитывая противостояние защитных функций природной среды техногенным факторам антропогенного воздействия со стороны промышленных объектов, функциональная взаимосвязь противоположных процессов в реальной ПТГ будет иметь вид:

$$\Delta P(t) = -\partial_g \bullet \Delta \mathcal{E}_\Sigma[(A, G, L); (B); t] \quad (5)$$

Специальные опытно-статистические исследования реальных ПТГ позволят глубже изучить механизмы взаимодействия рассматриваемых подсистем по выше рассмотренным аналитическим моделям.

**Заключение**

Таким образом, геоэкологический аспект защиты природной среды заключается в необходимости выявления допустимых масштабов трансформирования географической оболочки исследуемого природно-территориального комплекса в эпигеосферу с признаками локального и общерегионального антропогенного загрязнения. Причём экологическое загрязнение в рамках понятия, определённого ЮНЕСКО, включает не только прямое, непосредственное введение

$P_{t_0 t_1} = \frac{P_0(t_0)}{P_0(t_1)}$  - переход ПТГ без явного накопления антропогенных изменений (экологическое равновесие устойчиво).

$P_{t_1 t_2} = \frac{P_1(t_1, t_2)}{P_0(t_1)}$  - переход экосистемы из абсолютно устойчивого состояния в состояние с имеющимися незначительными остаточными антропогенными изменениями (условно равновесное состояние экосистемы)

$P_{t_2 t_3} = \frac{P_2(t_2, t_3)}{P_2(t_2)}$  - переход ПТГ в состояние с локальным нарушением равновесия (экологическая неустойчивость)

$P_{t_3 t_{пр.}}$  - переход ПТГ в предельное состояние (с полным нарушением экологического равновесия)

Функциональный переход природно-технической геосистемы от начального равновесия через промежуточные условно равновесные состояния к предельному характеризуется критическим уровнем накопления антропогенных изменений:

$$t_{пр} = \sum_{i=1}^n t_{e(g)_i} + t_{e(g)_2} + t_{e(g)} + \dots + t_{e(g)_n}; \quad \text{выполняя переход } t \rightarrow \infty,$$

имеем предельную условную вероятность накопления антропогенных изменений  $P_i^*$  в равновесной экосистеме  $g_i (i = 1, 2, 3 \dots n) \rightarrow P_i^* = \lim P_{g_i}(t)$

Рис. 3. Физический смысл функциональных переходов природно-технической геосистемы по стадиям антропогенных изменений [10, 11]

Fig. 3. The physical meaning of functional transitions of the natural-technical geosystem through the stages of anthropogenic changes [10, 11]

физико-химических реагентов или энергии в географическую оболочку, но и косвенное нарушение экологической целостности природного ландшафта [14]. К примеру, разрушающий механический эффект на действующих нефтепроводах и нефтехранилищах существенно меньше, чем на объектах транспорта и хранения газа. Однако, авария на магистральном нефтепроводе или ёмкостях-хранилищах нефти (нефтепродуктов) сопровождается выходом, как правило, значительного количества продукта, в результате чего резко возрастает опасность для загрязнения (с долговременными последствиями) грунтов, почво-растительных покровов и водных объектов. Причём физико-химическое воздействие нефтепроводов на почву и воду, как правило, приводит к режиму трудновосстанавливаемого (и даже невосстанавливаемого) самоочищения.

### Литература

1. Сергеева А.Ю. Модели и методы управления строительными проектами с учетом экологической обстановки в регионе: дис. ... канд. техн. наук: Воронеж: 2004:212.
2. Латышенко, К.П. *Экологический мониторинг: учебник и практикум для вузов*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Юрайт. 2025. 450. Доступно на: <https://urait.ru/bcode/560602> (дата обращения: 11 февраля 2025).
3. Куликова Е.Ю. *Подземная геоэкология мегаполисов: учебное пособие*. Горная книга Москва: 2005. 480 с. Доступно на: <https://e.lanbook.com/book/3242> (дата обращения: 20.02.2026).
4. Ефимов В.М. Ядрихинский И.В., Молдаванов О.И. Геотехнический мониторинг в ММГ как условие обеспечения инженерно-экологической безопасности промышленного освоения территории. Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». Москва: 2019.
5. Ядрихинский И.В. О значении фундаментальных исследований в решении глобальных экологических проблем. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021;(4):106. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.030
6. Стурман, В. И. *Геоэкология*. 5-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 228. Доступно на: <https://e.lanbook.com/book/276458> (дата обращения: 22.02.2026).
7. Алиев, Р. А., Авраменко А.А., Е. Д. Базилева *Основы общей экологии и международной экологической политики: учебное пособие*. Москва: Аспект Пресс, 2014. 384. Доступно на: <https://e.lanbook.com/book/68658> (дата обращения: 22.02.2026).
8. Меркулов П. И. *Геоэкологический анализ этносоциоприродных процессов на территории этногенеза мордовского народа*. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2015:181.
9. Азимов Ю.И., Ахмадулина И.А., Биль О. Н. *Наука, образование, технологии в эпоху глобальной трансформации*. Петрозаводск: Новая наука, 2024:314.
10. Кашников В.И. Геоэкологический анализ техногенно-природных геосистем: на примере г. Воронежа: дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж: 2007:177
11. Сурикова, Т.Б. *Экологический мониторинг: учебник*. 4-е изд., перераб. и доп. Старый Оскол: ТНТ. 2020. 344. Доступно на: <https://www.tnt-ebook.ru/library/book/211> (дата обращения: 17 февраля 2025).
12. Таранов Р.А. Марченко А.В., Особенности проектирования, строительства и эксплуатации магистральных нефтепроводов в зонах вечной мерзлоты, *Вестник науки и образования*. 2019:(12)66.
13. Царапов М.Н., Котов П.И. Свойства мерзлых грунтов при оттаивании *Путь и путевое хозяйство*. 2013:31–34.
14. Писаренко А.В. Обеспечение экологической безопасности безотказной работы экосистемы «человек-трубопровод-окружающая среда». В сборнике: *Безопасный и комфортный город*. Сборник научных трудов по материалам IV международной научно-практической конференции. 2020:490-492.

## References

1. Sergeeva A.Yu. Models and methods for managing construction projects taking into account the environmental situation in the region: diss. ... Cand. of Technical Sciences: Voronezh: 2004:212 (in Russian).
2. Latyshenko K.P. Environmental monitoring: textbook and workshop for universities. 3rd ed., revised. and expanded. Moscow: Yurayt; 2025. Available at: <https://urait.ru/bcode/560602> (accessed: 11 February 2025) (in Russian).
3. Kulikova E.Yu. Underground geocology of megacities: a study guide. Moscow: Gornaya kniga; 2005:480. Available at: <https://e.lanbook.com/book/3242> (accessed: 20 February 2026) (in Russian).
4. Efimov V.M., Yadrikhinsky I.V., Moldavanov O.I. In: *Geotechnical monitoring in MMG as a condition for ensuring engineering and environmental safety of industrial development of the territory: Proceedings of the XV All-Russian scientific and practical conference "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation*. Moscow: 2019 (in Russian).
5. Yadrikhinsky I.V. On the importance of fundamental research in solving global environmental problems. *International Research Journal*. 2021;(4):106 (in Russian). DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.030.
6. Sturman V.I. Geocology. St. Petersburg: Lan; 2023:228. Available at: <https://e.lanbook.com/book/276458> (accessed: 22 February 2026) (in Russian).
7. Aliev R.A., Avramenko A.A., Bazileva E.D. Fundamentals of general ecology and international environmental policy: a study guide. Moscow: Aspect Press; 2014:384. Available at: <https://e.lanbook.com/book/68658> (accessed: 22 February 2026) (in Russian).
8. Merkulov P.I. Geocological analysis of ethnosocionatural processes in the territory of ethnogenesis of the Mordvin people. Saransk: Publishing house of Mordovian University, 2015:181 (in Russian).
9. Azimov Yu.I., Akhmadullina I.A., Bil O.N. Science, education, and technology in the era of global transformation. Petrozavodsk: Novaya Nauka, 2024:314 (in Russian).
10. Kashnikov V.I. Geocological analysis of technogenic-natural geosystems: on the example of the city of Voronezh: diss. ... Cand. Geogr. Sciences. Voronezh: 2007:177 (in Russian).
11. Surikova T.B. Environmental monitoring: a textbook. 4th ed., revised and add. Stary Oskol: TNT; 2020. Available at: <https://www.tnt-ebook.ru/library/book/211> (accessed: 17 February 2025) (in Russian).
12. Taranov R.A., Marchenko A.V. Features of design, construction, and operation of trunk oil pipelines in permafrost zones. *Bulletin of Science and Education*. 2019;(12):66 (in Russian).
13. Tsarapov M.N., Kotov P.I. Properties of frozen soils during thawing. *Track and Track Facilities*. 2013:31–34 (in Russian).
14. Pisarenko A.V. Ensuring environmental safety and failure-free operation of the “human-pipeline-environment” ecosystem. In: *Safe and Comfortable City: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2020:490–492 (in Russian).

## Сведения об авторах

*ЯДРИХИНСКИЙ Иван Васильевич* – к.г.н., доцент Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, SPIN-код: 3493-9605, AuthorID: 747609

*ЕГОРОВА Туйаара Руслановна* – вед. спец. по промышленной и радиационной безопасности, АО «Алмазы Анабара», г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-7117-9218

*ВЛАСЕНКО Валентина Владимировна* – вед. спец. департамента по водным отношениям и регулированию рыболовства Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация

*ЕГОРОВА Саргылаана Руслановна* – студентка гр. Б-ТБ-22 ЭГО ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

*ДЕНИСОВА Анастасия Андреевна* – студентка гр. Б-ТБ-22 ЭГО ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

*ЗАХАРОВ Давид Григорьевич* – студент гр. Б-ТБ-22 ЭГО ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

### About the authors

*Ivan V. YADRIKHINSKY* – Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN-код: 3493-9605, AuthorID: 747609

*Tuiaara R. EGOROVA* – leading specialist in industrial and radiation safety, Almazy Anabara JSC, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7117-9218, SPIN-код: 5218-5617, e-mail: tuyaruslanovna@mail.ru  
e-mail: tuyaruslanovna@mail.ru

*Valentina V. VLASENKO* – leading specialist, Department of Water Relations and Fisheries Regulation, Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Sakha Republic (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

*Sargylaana R. EGOROVA* – student, Ecological and Geographical Department, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

*Anastasia A. DENISOVA* – student, Ecological and Geographical Department, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

*David G. ZAKHAROV* – student, Ecological and Geographical Department, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation.

### Вклад авторов

*Ядрихинский И.В.* – разработка концепции, методология, проведение исследования, анализ данных.

*Егорова Т.Р.* – верификация данных, анализ полученных данных, редактирование.

*Власенко В.В.* – проведение исследования

*Егорова С.Р.* – сбор данных

*Денисова А.А.* – сбор данных

*Захаров Д.Г.* – сбор данных.

### Authors' contribution

*Ivan V. Yadrikhinsky* – concept development, methodology, research implementation, data analysis.

*Tuiaara R. Egorova* – data verification, data analysis, editing

*Valentina V. Vlasenko* – research implementation

*Sargylaana R. Egorova* – data collection

*Anastasia A. Denisova* – data collection

*David G. Zakharov* – data collection.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Корреспондент имеет прав и полномочия выступать от имени всех авторов по этому исследованию.

### Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests. Corresponding author has the right and authority to speak on behalf of all authors on this study.

*Поступила в редакцию / Submitted 03.03.2026*

*Поступила после рецензирования / Revised 23.03.2026*

*Принята к публикации / Accepted 27.03.2026*