

УДК 332.14

<https://doi.org/10.25587/2587-8778-2026-3-50-64>

Оригинальная научная статья

Водопотребление в Якутии при промышленном освоении территорий

Е. Э. Григорьева^{1}, А. И. Егорова^{1,2}*¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
г. Якутск, Российская Федерация² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

*✉elena.grigoreva80@mail.ru

Аннотация

Устойчивость северных территорий формирует востребованность в сохранении и бережном использовании природных ресурсов, особенно невосполняемых и исчерпаемых сырьевых ресурсов. В рамках исследования природопользования на Севере водопотребление рассматривается как критический фактор системы «экономика–экология», требующий оптимизации и ресурсосбережения в контексте стратегии устойчивого развития. Интенсивное промышленное освоение северных территорий России определяет рост потребления водных ресурсов, что во многом коррелирует с темпами добычи полезных ископаемых. Специфика применяемых энергетических и добывающих технологий напрямую влияют на объемы потребления природных ресурсов и уровень антропогенной нагрузки на окружающую среду. Наличие доступа к информационным системам мониторинга экономико-экологическим параметрам территорий позволяет разрабатывать методологические инструментари для оценки, моделирования и прогнозирования эколого-экономического воздействия на природную среду. В данной работе представлены результаты эконометрического анализа водопотребления в муниципальных районах ресурсного региона (на примере Республики Саха (Якутия). Авторами предложен вычислительный алгоритм использования информационных систем мониторинга для формирования прогностических моделей водопотребления районов, учитывающих как производственные показатели добывающих отраслей, так и требования устойчивого развития хрупких северных экосистем. Отличительной особенностью разработанного инструментария является учет нелинейных зависимостей, в первую очередь – эффекта масштаба, проявляющегося в снижении удельного водопотребления (технологического коэффициента) при росте объемов добычи полезных ископаемых. Апробация модели на примере Нерюнгринского района подтвердила ее высокую прогностическую способность (ошибка аппроксимации 1,41%) и позволила выявить степенной характер зависимости водопотребления от объемов добычи угля.

Ключевые слова: водные ресурсы, водопотребление, северные территории, Республика Саха (Якутия), промышленное освоение, добыча полезных ископаемых, нелинейная модель, расчетные исследования, классификация, группировка

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ по проекту государственного задания №FSRG-2026-0009 «Математическое моделирование и анализ в фундаментальных и прикладных задачах».

Для цитирования: Григорьева Е.Э., Егорова А.И. Водопотребление в Якутии при промышленном освоении территорий. *Экономика и природопользование на Севере*. 2026, № 3(43). С. 50-64. DOI: 10.25587/2587-8778-2026-3-50-64

Original article

Use of water resources in Yakutia during the industrial development of territories

Elena E. Grigoryeva^{1}, Angelina I. Egorova^{1,2}*

¹M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

*✉elena.grigoreva80@mail.ru

Abstract

The stability of the northern territories creates a demand for the conservation and careful use of natural resources, especially non-renewable and exhaustible raw materials. Within the framework of the study of natural resource management in the North, water consumption is considered as a critical factor of the “economy-ecology” system, which requires optimization and resource conservation in the context of a sustainable development strategy. Intensive industrial development of the northern territories of Russia determines the growth of water consumption, which largely correlates with the rate of mining production. The specifics of the energy and mining technologies used directly affect the volume of consumption of natural resources and the level of anthropogenic load on the environment. Access to information systems for monitoring the economic and environmental parameters of territories makes it possible to develop methodological tools for assessing, modeling and forecasting the environmental and economic impact on the environment. This paper presents the results of an econometric analysis of water consumption in municipal districts of the resource region, using the case of the Sakha Republic (Yakutia). The authors propose a computational algorithm for the use of monitoring information systems for the formation of predictive models of use of water resources in areas, taking into account both the production indicators of the extractive industries and the requirements of sustainable development of fragile northern ecosystems. A distinctive feature of the developed tools is the consideration of nonlinear dependencies, primarily the economies of scale, which manifest themselves in a decrease in specific use of water resources (technological coefficient) with an increase in the volume of mineral production. Approbation of the model on the example of Neryunginsky district confirmed its high predictive ability (approximation error of 1.41%) and made it possible to identify the power nature of the dependence of water consumption on the volume of coal production.

Keywords: water resources, water consumption, northern territories, Sakha Republic (Yakutia), industrial development, mining, nonlinear model, computational studies, classification, grouping

Funding: The article was prepared with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the draft state assignment NoFSRG-2026-0009 “Mathematical modeling and analysis in fundamental and applied problems”.

For citation: Grigoryeva E.E., Egorova A.I. Use of water resources in Yakutia during the industrial development of territories. *Economy and Nature Management in the North*. 2026, No 3(43). Pp. 50-64. DOI: 10.25587/2587-8778-2026-3-50-64

Введение

Процесс промышленного освоения северных территорий продолжает продвигаться в более отдаленные районы Крайнего Севера и Арктики РФ. Сегодня экономическая модель северного региона представляет собой уникальную комбинацию отраслей традиционных видов природопользования (рыболовство, оленеводство, собирательство и др.) и отраслей горнодобывающего производства. При этом если ресурсная база традиционного сектора экономики использует возобновляемые ресурсы (флоры, фауны), то промышленный сектор использует невозобновляемые полезные ископаемые, попутно оказывая высокую техногенную нагрузку на окружающую среду [1, 2]. При этом сложившаяся двухуровневая структура экономики северных территорий тесно связана с доступными запасами природно-ресурсной базы, а также природно-климатическими и инфраструктурными условиями. Длительная промышленная эксплуатация природных ресурсов приводит

к формированию сложного социально-экономического процесса освоения сырьевых территорий [3–5]. В целях сохранения природного наследия для следующих поколений в рамках концепции устойчивого развития территорий [6] одним из ключевых факторов является использование водных ресурсов. Таким образом, изменение производительных сил на северной территории приводит к изменению динамики использования водных ресурсов. При этом отсутствует связность и согласованность между процессами планирования добычи полезных ископаемых (углеводородов, алмазов, металлов) и дефицитом качественной пресной воды в ряде районов. Сегодня наличие открытого доступа к информационным системам мониторинга экономико-экологическим параметрам территорий позволяет разрабатывать методологические инструментарию для оценки, моделирования и прогнозирования эколого-экономического воздействия на природную среду. Поставлена цель исследования в обосновании предложенного эконометрического инструментарию для прогнозирования водопотребления территорий для минимизации экологических рисков при промышленном освоении.

Методы и материалы исследования

Теоретической и методологической основой исследования стали научные труды по различным аспектам водопотребления, использования водных ресурсов территорий и экологического управления [7–9], а также труды, связанные с аспектами промышленного освоения северных территорий и их воздействия на окружающую среду [1–6]. Источниками количественных данных для проведения расчетных исследований стали информационные системы мониторинга (ИС) данных Росводресурсов, Минприроды России, Роснедра, Росстата, системы экологического мониторинга Республики Саха (Якутия). При исследовании использовались простейшие методы статистической обработки данных, сравнительного и стратегического анализа, методы моделирования и др. Вычислительный алгоритм разработан в редакторе платформы MS Excel для последующего программирования в Python с целью автоматизации расчетов.

Методологический подход исследования основан на выявлении взаимосвязи водопотребления северных территории с темпами роста региональной экономики. Вычислительный алгоритм оценки и прогнозирования водопотребления Якутии базируется на интеграции данных экологического мониторинга и эконометрического моделирования экономического роста в разрезе муниципальных районов. Алгоритм исследования состоит в выполнении нескольких последовательных этапов:

- формирование базы данных агрегированных параметров из информационных систем мониторингов по каждому муниципальному району Якутии, включая экономические, экологические, социально-демографические, природно-климатические параметры;
- классификация районов по типу освоения в зависимости от веса вида экономической деятельности на северной территории;
- построение эконометрической многофакторной модели объема водопотребления района для оценки, прогнозирования и моделирования социально-экономических процессов, влияющих на водопотребление территории;
- оптимизация и оценка устойчивости модели: проверка лимитов водопотребления, оценка оборотного водоснабжения, оценка эколого-допустимых объемов изъятия водных ресурсов;
- визуализация и прогнозирование результатов: построение прогностических карт водопотребления, разработка рекомендаций по сценарным вариантам развития территорий, оценка возможных экологических рисков.

О текущем водопотреблении в целом по республике

Приведем некоторые основные показатели экологического мониторинга окружающей среды Республики Саха (Якутия) за период 2015–2024 гг. для определения текущих изменений в условиях промышленного освоения территорий (табл. 1).

Таблица 1

Показатели состояния окружающей среды Республики Саха (Якутия)

Table 1

Indicators of the state of the environment of the Sakha Republic (Yakutia)

Показатель	2015 г.	2024 г.	2024/2015, %
Площадь территории, тыс. кв. км	3085,5	3085,5	100
Численность населения, тыс. чел.	959,7	1006,6	105
ВРП, млрд руб.	747,6	2229,8	298
ВРП на душу населения, тыс. руб.	780,1	2215,3	284
Среднегодовая температура воздуха, °С	-9,5	-8,3	87
Совокупный объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, тыс. т	359,0	418,3	117
от стационарных источников	286,6	403,6	141
от автомобильного транспорта	72,4	13,3	18
Забрано пресной воды из ПВО, млн куб. м	209,96	224,73	107
из подземных источников, млн куб. м	73,13	73,28	100
из поверхностных источников, млн куб. м	136,83	151,45	111
Использование пресной воды, млн куб. м	165,52	191,12	115
Оборотное и повторное-последовательное водоснабжение, млн куб. м	1246,28	1286,87	103
Водоотведение, млн куб. м	144,8	175,0	121
Сброс недостаточно очищенных загрязненных сточных вод, млн куб. м	80,0	64,7	81
Образование отходов, млн т	252,7	946,8	375

Источник: данные Росгидромета, Росводресурсов.

Интенсивный рост в два раза валового регионального продукта Республики Саха (Якутия) (ВРП) вызван доминированием промышленного сектора региональной экономики в первую очередь за счет увеличения объемов производства добывающих отраслей. При этом основной вклад вносят добыча нефти, природного газа, золота, угля и алмазов. В 2024 г. темп роста ВРП оценивался на уровне 105,5% (РФ – 102,8%). Темпы экономического роста добывающей промышленности поддерживаются реализацией крупных инвестиционных проектов энергетической и транспортной инфраструктуры (например: газопровод «Сила Сибири», строительство Ленского моста, модернизация аэропортов и др.) [10, 11]. Тем самым наличие внешнего спроса на минерально-сырьевые ресурсы и развитие инфраструктуры территории позволяет по-новому взглянуть на промышленное освоение труднодоступных территорий [12].

В Якутии водопотребление в основном связано с потреблением пресной воды. Забор пресной воды из поверхностных водных объектов (ПВО) в 2024 г. возрос до 224,73 млн куб. м, или на 7,03% в сравнении с 2015 г. При этом объем водоотведения за аналогичный период возросло на 20,8% до 175 млн куб. м. В то же время сброс недостаточно очищенных загрязненных сточных вод сократился на 19,1%, что определяет положительную

активность действий по очистке сточных вод. Однако нельзя не отметить экологические риски, связанные с образованием отходов, которые увеличились в 4 раза до 946,8 млн т, из которых 434,7 млн т направляются на захоронение и только 256,6 млн т на утилизацию. Динамика показателей объема образования отходов в среднем по стране также показывает устойчивый рост, но только на 68% в сравнении с 2015 г. В структуре водопользования Якутии преобладает потребление воды для производственных нужд, в 2024 г. составило 88,56 млн куб. м, что больше на 7,7% чем в 2015 г., или 52,7% от всего объема водопотребления (табл. 2).

Таблица 2

Структура водопользования Республики Саха (Якутия)

Table 2

Structure of water use in the Sakha Republic (Yakutia)

Показатель	2015 г.	%	2024 г.	%	2024/2015, %
Производственные нужды, млн куб. м.	82,24	53,4	88,56	52,7	108
Сельскохозяйственное водоснабжение, млн куб. м	0,12	0,1	0,08	0,0	67
Питьевые и хозяйственно-бытовые нужды, млн куб. м	43,96	28,6	34,84	20,7	79
Орошение, млн куб. м	16,91	11,0	34,13	20,3	202
Прочие, млн куб. м	10,7	7,0	10,36	6,2	97
Всего, млн куб. м	153,93	100	167,97	100	109
Бытовое водопотребление на душу населения, куб. м/год на чел.	46	-	35	-	76

Источник: данные Росстата

Водопотребление для хозяйственно-питьевых нужд в республике сократилось на 20,7%, или до 34,84 млн куб. м. Тем самым снизилась норма бытового водопотребления на душу населения с 46 до 35 куб.м/год на чел., что связано с экономией и учетом расходов населения на водопотребление. Но имеется тенденция роста водопотребления для орошения с 16,91 до 34,13 млн куб. м, что является результатом мер направленных на обводнение засушливых районов из-за изменения климатических условий и сокращения выпадения осадков.

Анализ основных экологических показателей по водным ресурсам в разрезе ключевых видов экономической деятельности по Республике Саха (Якутия) за анализируемый период 2015–2024 гг. показал, что основная часть из общего объема забора воды в 2024 г. пришлось на предприятия и организации, относящиеся к отрасли «Обеспечение электроэнергией, газом и паром, кондиционирование воздуха» – 45%, что характерно также в среднем по стране. Но региональной особенностью является растущая доля отрасли «Добыча полезных ископаемых» – 33% забора и 49% отведения (табл. 3). В отличие от РФ, в Якутии практически отсутствует водоотведение в сельском хозяйстве и обрабатывающей промышленности, а экологическая нагрузка на водные объекты смещена в сторону добывающего сектора.

Таблица 3

Распределение объема забора воды из природных водных объектов и водоотведения по основным видам экономической деятельности

Table 3

Distribution of the volume of water withdrawal from natural water bodies and wastewater disposal by main types of economic activity

Виды экономической деятельности	Доля водопотребления в 2024 г.		Доля водоотведения в 2024 г.	
	РФ	РС (Я)	РФ	РС (Я)
Обеспечение электроэнергией, газом и паром, кондиционирование воздуха	39,4%	45%	52%	50%
Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство	24,1%	16%	11%	0%
Добыча полезных ископаемых	7,8%	33%	4%	49%
Обрабатывающие производства	6,0%	0%	7%	0%
Транспортировка и хранение	4,0%	4%	0%	0%
Прочие	18,7%	1%	26%	1%

Источник: данные Росводресурсов, Министерства охраны природы РС (Я)

Группирование районов Якутии по водопотреблению

Структура распределения забора воды из природных водных объектов по муниципальным районам Якутии достаточно устойчива во времени [7], но ассиметрична по пространственному фактору (к примеру, см. рис. 1).

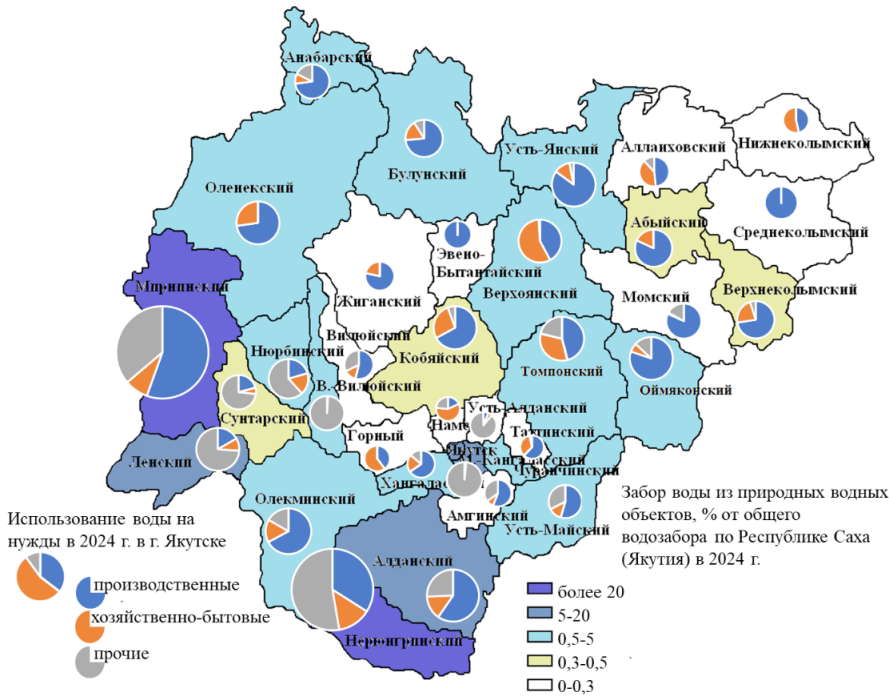


Рис. 1. Распределение объемов забора и использования воды для нужд по муниципальным районам Якутии в 2024 году

Fig. 1. Distribution of the volume of water intake and use for needs by municipal districts of Yakutia in 2024

Максимальный объем забора воды из природных источников относится к Мирнинскому и Нерюнгринскому районам (более 20% от общего водозабора во республике). Данные районы характеризуются развитой добывающей отраслью, наличием крупных предприятий энергетической инфраструктуры, а также наличие моногородов с населением более 34 тыс. чел. Ко второй группе районов относятся следующие: Ленский, Алданский, Мегино-Кангаласский, г. Якутск (от 5-20% от общего водозабора во республике). В совокупности к 1 и 2 группе приходится 84,08% от общего водозабора во республике.

В результате комплексного анализа водопотребления и экономической структуры муниципальных районов Республики Саха (Якутия) за период 2023-2024 гг., позволяет сделать следующие выводы по ключевым аспектам:

- наличие высокой концентрации и неравномерности водопотребления в Якутии: имеется значительный разрыв между промышленными и остальными районами республики. Имеется локализация объемов забора воды в 6 районах, в то время как подавляющее большинство (17 районов) потребляют менее 1 млн куб. м/год. Почти половина районов (13 из 35) имеют удельный вес в общем водопотреблении менее 0,3%, что говорит о крайне низкой индустриализации или плотности населения в данных районах;

- классификация по валовому муниципальному району (ВМП) объясняет причины распределения воды, а также взаимосвязь экономики и использования водных ресурсов. Выявлено доминирование добывающей промышленности (14 районов), который коррелирует с основным объемом водопотребления. При этом ориентация районов на сельское хозяйство и торговлю коррелирует с низкими показателями объема водопотребления;

- технологическая эффективность использования воды (водоемкость ВМП) демонстрирует низкую водоемкость большинства районов (17 районов до 0,08 тыс. куб. м/ млн руб.). А также аномально высокую водоемкость Мегино-Кангаласского района (1,4 тыс. куб. м/ млн руб.), что указывает на некорректный учет данных по району в мониторинге без учета исключения перекачки воды для Чурапчинского и Таттинского улусов. Использование объемов забора воды из р. Лены по магистральному водоводу из Нижнего Бестяха для перекачки воды на территории Мегино-Кангаласского, Чурапчинского и Таттинского улусов осуществляется для орошения сенокосных, пастбищных и полива сельскохозяйственных угодий.

Таким образом, в современных условиях промышленного освоения Якутии характерно четкое разделение на высокоинтенсивный промышленный сектор с доминированием небольшого количества добывающих районов с высоким потреблением воды и аграрно-торговым сектором с низким уровнем водопотребления.

Эконометрический инструментальный анализа, прогноза и моделирования водопотребления по районам Якутии

В ранее выполненных работах [7–9] были разработаны подходы к эколого-экономической оценке воздействия на водные ресурсы с применением современных методов: декарпинг, каплинг, концепция водного следа Хоекстра, модель экологического следа водных ресурсов Хуанг и традиционные математико-статистические методы прогнозирования на основе временных рядов. В данной работе применен отличительный подход к моделированию объемов водопотребления районов с учетом модельных расчетов динамики производственных показателей промышленности и численности населения как потребителя воды в разрезе муниципальных районов Якутии. Данный подход может быть применим к северным регионам ресурсного типа РФ с доминированием добывающей отрасли в региональной экономике. Процесс эконометрического моделирования осуществляется на построении регрессионной модели и вычислении зависимостей следующего вида (формула 1):

$$W_{\text{общ}} = f(Q, In, L, E, P, CH, e) \quad (1)$$

где:

$W_{\text{общ}}$ – объем водопотребления или забор пресной воды из природных источников в районе, тыс. куб. м;

Q , – объем добычи полезного ископаемого (по отраслям), тыс. т;

In – технологический коэффициент (удельный забор пресной воды на единицу добычи), куб. м/тонну;

L – численность населения района, тыс. чел.;

E – производство электроэнергии в районе как показатель, характеризующий энергозатраты на подогрев воды для нужд промышленности и населения;

P – потери воды при транспортировке как показатель зависящий от износа инфраструктуры в условиях вечной мерзлоты;

CH – производство продукции сельского хозяйства как показатель, характеризующий затраты воды на орошение;

e – случайная составляющая.

Общий прогнозный объем водопотребления муниципального района Якутии с учетом промышленного освоения территории предлагается рассчитать по нелинейной модели для добывающих районов (формула 2):

$$W_{\text{общ}} = e + aW_{\text{потр}} + bW_{\text{пром}} + cQ + dE + pW_{\text{быт}} + oL + sP, \quad (2)$$

где:

$W_{\text{потр}}$ – водопотребление на все нужды района (использовано свежей воды), тыс. куб. м;

$W_{\text{пром}}$ – водопотребление на производственные нужды района, тыс. куб. м;

$W_{\text{быт}}$ – водопотребление на хозяйственно-бытовые нужды района, тыс. куб. м;

a, b, c, d, p, o, s – коэффициенты регрессии.

Структура вычислительного алгоритма анализа и моделирования водопотребления в муниципальных районах Якутии базируется на интеграции данных мониторинга и эконометрического моделирования в последовательном выполнении следующих действий, описанных в блок-схеме на рисунке 2.



Рис. 2. Блок-схема вычислительного алгоритма оценки и моделирования водопотребления по муниципальным районам Якутии

Fig. 2. Flowchart of a computational algorithm for assessing and modeling water consumption in municipal districts of Yakutia

Вычислительный алгоритм позволяет учесть некоторые основные переменные факторы водопотребления районов:

- объемы добычи по видам полезных ископаемых от размещенных производственных объектов на территории района в зависимости от стадии освоения месторождения;
- технологии производства с потреблением воды на данных промышленных объектах;
- временного периода временного производства;
- изменения численности населения как потребителей воды, в зависимости от демографической ситуации на территории района.

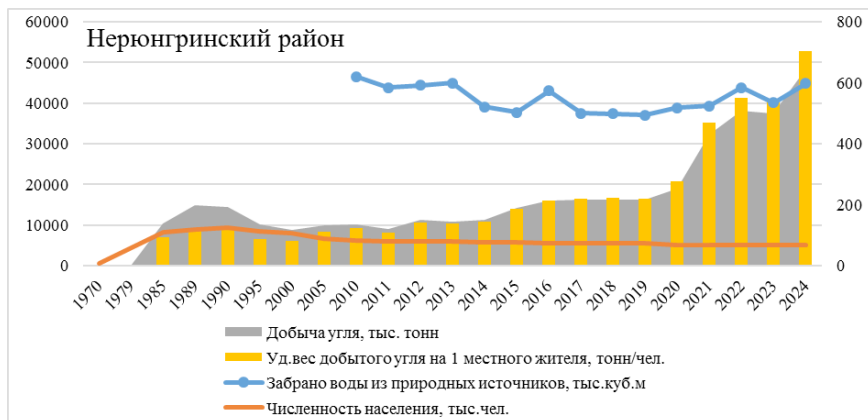
На основе полученной новой информации возможно построение прогностических карт водопотребления для конкретных промышленных узлов, а также получение выводов по эколого-экономическому воздействию и антропогенной нагрузке на хрупкие северные экосистемы муниципального района.

Результаты расчетных исследований

В данной статье представим результаты моделирования и прогноза водопотребления по Нерюнгринскому району, который классифицируется как добывающий район, где доля добычи полезных ископаемых в ВМП свыше 30%. За годы промышленного освоения территории Нерюнгринского района (в данном случае рассматриваем временной период с 1970 г. по н.в.), формирование численности населения города и рабочих поселков прошло в несколько этапов: от промыслового до экспортноориентированного (рис. 3).

Процесс трансформации государственной политики (1990–2002 гг.) характеризуется активным государственным протекционизмом на основе рыночных принципов, усилением регионализации и началом точечного освоения природных ресурсов конкурентоспособных на внешнем рынке [13]. Данные обстоятельства обусловили спад производства и следствие отток трудовых ресурсов на треть числа жителей района [11, с. 100]. А развитие других отраслей ограничивалось решением задач жизнеобеспечения территории [14-15].

Современный этап диверсификации (2016 г. – н.в.) характерен направленностью на достижение устойчивого развития территории, в том числе за счет усиления диверсификации хозяйства и реструктуризации экономики. При этом объем добычи угля в районе возрос в 4,8 раза, или с 10,1 млн т до 48,2 млн т за счет ввода в эксплуатацию крупнейших инвестиционных проектов компаний «Колмар» и «Эльгауголь» (рис. 3).



Источник: данные Сахастата

Рис. 3. Водопотребление и добыча угля Нерюнгринского района Якутии
Fig. 3. Use of water resources and coal production in Neryunginsky district of Yakutia

Также развитие транспортной инфраструктуры позволило снять логистические ограничения и выйти на рынки стран Азии за счет завершения строительства частной железной дороги к порту «Эльга» в Хабаровском крае. Активный рост добычи угля сопровождается при тенденции сокращения численности населения района с 82,6 до 68,6 тыс. чел. и снижении $W_{\text{быт}}$ на 33,8%. Анализ ретроспективных данных за 2010-2024 гг. по Нерюнгринскому району Якутии показывает, что объем общего водопотребление забор воды из природных источников ($W_{\text{общ}}$) снизился на 3,7% в сравнении с 2010 г. Построенная корреляционная матрица параметров исследуемой модели (табл. 4) обосновывает выбор переменных модели и объясняет тесную корреляционную связь между ее параметрами.

Таблица 4

Корреляционная матрица параметров модели на данных Нерюнгринского района

Table 4

Correlation matrix of model parameters based on data
from Neryungrinsky district

	$W_{\text{общ}}$	$W_{\text{потр}}$	$W_{\text{пром}}$	Q	E	$W_{\text{быт}}$	L	P
$W_{\text{общ}}$	1,000							
$W_{\text{потр}}$	-0,002	1,000						
$W_{\text{пром}}$	-0,335	0,891	1,000					
Q	0,072	0,199	0,355	1,000				
E	-0,448	0,101	0,392	0,365	1,000			
$W_{\text{быт}}$	0,641	0,020	-0,424	-0,550	-0,676	1,000		
L	0,383	-0,109	-0,448	-0,828	-0,587	0,891	1,000	
P	0,460	-0,045	-0,420	-0,698	-0,817	0,909	0,903	1

Источник: расчеты авторов

Для построения прогнозной оценки $W_{\text{потр}}$ используем долю от суммы промышленного и бытового водопотребления, так как с прочими нуждами использования свежей воды и ее параметрами связь незначительна. По данным за 2010–2024 гг. в Нерюнгринском районе наблюдается стабилизация водопотребления на хозяйственно-бытовые нужды ($W_{\text{быт}}$) на уровне $\approx 35,2$ куб.м/чел в год при численности населения $\sim 68\text{--}69$ тыс.чел. Следовательно, прогнозная оценка $W_{\text{быт}}$ может изменяться при изменении численности населения (L) в районе.

Нелинейная модель и прогнозирование водопотребления

По данным Нерюнгринского района за 2010–2024 гг. наблюдается нелинейная зависимость водопотребление (забора воды из природных источников) от промышленного производства $W_{\text{пром}}$ и других параметров модели. Для составления прогнозной оценки $W_{\text{общ}}$ в районе до 2028 г. используем нелинейную регрессионную модель (формула 3):

$$W_{\text{общ}} = -68211 + 8,33W_{\text{потр}} - 8,46W_{\text{пром}} + 0,29Q + 0,67E - 9,59W_{\text{быт}} + 1436,08L + 0,68P$$

(3)

При построении регрессии моделируемых параметров была получена регрессионная статистика модели (формула 3), определяющая хорошую прогностическую способность ($R^2 \approx 0,8$), в том числе стандартной ошибки прогноза водопотребления района равной 2336 тыс. куб. м. Определено, что уменьшение количества параметров модели приводит к снижению качества модели и ее прогностической способности

Наиболее значимым нелинейным параметром является технологический коэффициент (I_n) – удельный забор воды на единицу добычи полезного ископаемого, в данном случае добычи угля. Модель технологического коэффициента имеет степенную зависимость и имеет вид (формула 4):

$$I_n = aQ^b \tag{4}$$

Используя данные Нерюнгринского района за 2010-2024 гг., получили модель $I_n = 2670,1 * Q^{(-0,842)}$ с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,8$ (высокая точность). Следовательно, модель водопотребления $W_{\text{пром}}$ в зависимости от объема добычи угля в районе имеет вид (формула 5):

$$W_{\text{пром}} = I_n Q = 2670,1 Q^{0,152} \tag{5}$$

В ходе расчетных исследований были использованы прогнозы добычи угля (Q) в Нерюнгринском районе до 2028 г. проведенные Министерством экономики Республики Саха (Якутия) по базовому и целевому сценарию, а данные 2025 года являются оценочными (табл. 5). Применяемый инструментарий позволяет создать имитацию параметров модели с множеством сценарных вариантов развития района.

Таблица 5

Моделируемые условия параметров нелинейной модели водопотребления Нерюнгринского района Якутии по данным 2010–2024 гг.

Table 5

Simulated conditions of the parameters of the nonlinear model of water consumption in Neryungrinsky district of Yakutia according to the data of 2010–2024

Сценарии	Год	Q, тыс. т	Е, млн кВт-час	L, тыс.чел.
Базовый сценарий	2025	53552	3424	68,7
	2026	62820	3441	68,7
	2027	73519	3458	68,7
	2028	75819	3474	68,6
Целевой сценарий	2025	53552	3424	68,6
	2026	65268	3441	68,6
	2027	79169	3458	68,6
	2028	80869	3474	68,6
Сравнение с линейной моделью	2025	43377	3424	67,1
	2026	48498	3441	66,6
	2027	53985	3458	66,0
	2028	59841	3474	65,6

Источник: рассчитано авторами

Верификация модели. При расчетах выполняется сравнение параметров с моделью линейной аппроксимации, которые в основном неадекватны и упрощают реальный процесс. Линейная модель отлично аппроксимирует показатели численности персонала (L) и потребления энергии (E), но крайне плохо справляется с прогнозом объема производства (Q), значительно занижая значения по сравнению с обоими сценариями. Линейная модель непригодна для показателя (Q), так как ее средняя ошибка (MAPE) превышает 22%, а в ретроспективе она ошибается на 14,7%.

Используя нелинейную модель (формула 3), проводим прогнозную оценку водопотребления ($W_{\text{общ}}$) Нерюнгринского района Якутии до 2028 г., результаты которой представлены в таблице 6.

Таблица 6

Сводный прогноз водопотребления Нерюнгринского района Якутии до 2028 г.

Table 6

Summary forecast of water consumption in Neryungrinsky district of Yakutia until 2028

Сценарии	Год	W _{потр}	W _{пром}	W _{быт}	W _{общ}
Базовый сценарий, тыс. куб. м	2024	22111	15265	5963	44878
	2025	20927	14917	5127	48489
	2026	21309	15298	5128	51118
	2027	21694	15683	5128	54189
	2028	21774	15759	5131	54757
Целевой сценарий, тыс. куб. м	2024	22111	15265	5963	44878
	2025	20932	14917	5131	48342
	2026	21405	15390	5131	51700
	2027	21882	15867	5131	55693
	2028	21935	15921	5131	56191
Сравнение с линейной моделью, тыс.куб.м	2024	22111	15265	5963	44878
	2025	20577	14428	5265	44489
	2026	20913	14685	5344	45515
	2027	21248	14936	5429	46541
	2028	21578	15181	5514	47568

Источник: рассчитано авторами

Проверим точность нелинейной модели на исторических данных (2024 год): $W_{общ}/факт$ 2024: 44 878 тыс. куб.м, а $W_{общ}/расчет$ по модели: 45510 тыс.куб.м. Относительное отклонение ошибки составляет 1,41%, что определяет высокую точность модели и адекватности модели на исторических данных (совпадение в пределах погрешности). Для повышения точности прогноза рекомендуется ежегодно уточнять технологический коэффициент In по фактическим данным и корректировать степенную модель (формула 5).

На основе полученных данных по водопотреблению Нерюнгринского района до 2028 года можно сделать следующие выводы: промышленный сектор является основным драйвером роста экономики Нерюнгринского района, при целевом сценарии объемы добычи угля увеличиваются по экспоненциальной траектории с 53,5 млн т до 80,9 млн т. При таких темпах роста (Q) в целевом сценарии водопотребление района увеличивается с 44,9 млн до 56,2 млн куб. м с учетом снижения удельного водопотребления (In). Следовательно, при прогнозируемых темпах добычи угля в Нерюнгринском районе общее водопотребление может возрасти к 2028 г. на 25%. Таким образом, для системы ЖКХ и промышленного планирования промпредприятий рекомендуется принять меры по опережающему развитию инфраструктуры водоснабжения по сравнению с текущими трендами.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сформулировать следующие основные выводы и рекомендации:

1. В результате интенсивного промышленного освоения северных территорий Республики Саха (Якутия) наблюдается устойчивая трансформация структуры водопотребления. При этом определяется высокая пространственная асимметрия и локальная концентрация водохозяйственной нагрузки в добывающих районах с промышленной активностью. Анализ динамики ключевых экологических показателей за период 2015–2024 гг. выявил рост промышленного водопотребления (7,03%) на фоне двукратного увеличения ВРП и четырехкратного роста образования отходов, что подтверждает сохранение экстенсивной модели природопользования и экологической нагрузки в регионе.

2. Предложенный методологический подход, основанный на интеграции данных экологического мониторинга и эконометрического моделирования, позволил разработать вычислительный алгоритм прогнозирования водопотребления на муниципальном уровне. Отличительной особенностью разработанного инструментария является учет нелинейных зависимостей, в первую очередь – эффекта масштаба, проявляющегося в снижении удельного водопотребления (технологического коэффициента) при росте объемов добычи полезных ископаемых. При этом линейные модели прогнозирования, не учитывающие технологическое совершенствование, систематически завышают ожидаемую нагрузку на водные ресурсы, что подчеркивает необходимость применения нелинейного инструментария для обоснования управленческих решений.

3. Апробация модели на примере Нерюнгринского района подтвердила ее высокую прогностическую способность (ошибка аппроксимации 1,41%) и позволила выявить степенной характер зависимости водопотребления от объемов добычи угля. Результаты сценарного прогнозирования до 2028 г. демонстрируют, что при сохранении текущих темпов наращивания добычи угля (до 80,9 млн тонн по целевому сценарию) совокупное водопотребление в Нерюнгринском районе может возрасти до 25% – с 44,9 до 56,2 млн куб. м. Полученные результаты имеют практическую значимость для региональных органов власти и промышленных предприятий при планировании развития водохозяйственной инфраструктуры, разработке программ модернизации систем водоснабжения и водоотведения, а также при оценке экологических рисков, связанных с ростом антропогенной нагрузки на водные объекты в зонах интенсивного промышленного освоения.

Литература

1. Саввинов Г.Н., Макаров В.С., Величенко В.В. Экосистемы Якутской Арктики: современные вызовы и угрозы. *Проблемы региональной экологии*. 2023; 2: 63–73. DOI:10.24412/1728-323X-2023-2-63-73.
2. Астахова И.С. Отношение населения к промышленному освоению территорий традиционного проживания коренных малочисленных народов Севера (на материалах этнологических экспертиз в Садынском наслеге Республики Саха (Якутия)). *Арктика и Север*. 2024; 55: 97–115. DOI:10.37482/issn2221-2698.2024.55.97.
3. Бессонова Т.Н. Эволюция освоения северных сырьевых территорий. *Вестник Югорского государственного университета*. 2016; 4(43): 41–48. EDN: XHNLKP.
4. Архипова Ю.А. Освоение георесурсов Дальнего Востока России: аспекты текущего периода и перспективы развития. *Горный журнал*. 2024; 6: 21–26. DOI:10.17580/gzh.2024.06.03.
5. Бурцева Е.И., Слепцов А.Н., Бысыгина А.Н. Промышленное освоение территорий Арктической зоны Якутии и этнологическая экспертиза инвестиционных проектов. *Арктика и Север*. 2023; 51: 52–72. DOI:10.37482/issn2221-2698.2023.51.52.
6. Никифорова В.В. Оценка потенциала устойчивого развития добывающей промышленности северных регионов ресурсного типа. *Арктика XXI век. Гуманитарные науки*. 2022; 4(30): 57–76. DOI: 10.25587/SVFU.2022.35.20.005.
7. Никоноров С.М., Егорова А.И., Григорьева Е.Э. Воздействие промышленного освоения северных районов на водные ресурсы: модель прогноза на примере Республики Саха (Якутия). *Экономика промышленности*. 2025; 18(4): 529–543. DOI: 10.17073/2072-1633-2025-4-1536.

8. Egorova A.I., Grigoryeva E.E. Use of water resources in the northern territories of Yakutia for industrial development: A forecast model. *BIO Web of Conferences*. 2025;194:01022. DOI:10.1051/bioconf/202519401022.

9. Никоноров С.М., Папенков К.В., Ховавко И.Ю., Егорова А.И. Подходы к эколого-экономической оценке декарпинга (на примере виртуальной торговли водой). *Проблемы современной экономики*. 2024; 4(92): 220-222. EDN: PNOVTP.

10. Батугина Н.С., Барашкова А.С., Гуляев П.В. и др. *Устойчивость пространственной организации социально-экономических систем северных регионов ресурсного типа*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2022:298.

11. Егоров Е.Г. и др. *Южная Якутия: потенциал и территориальная организация хозяйственного комплекса*. СПб.: Изд-во Политех. ун-та; 2013: 308.

12. Крюков Я.В. Направления трансформации ресурсного сектора Республики Саха (Якутия) в новейших условиях. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Экономика. Социология. Культурология*. 2023;2(30):7-16. DOI:10.25587/SVFU.2023.77.53.001.

13. Крюков В.А., Крюков Я.В. Неоиндустриализация – к «новой геометрии» экономических пространственных взаимодействий. *Пространственная экономика*. 2024;20(3):7-38. DOI: 10.14530/se.2024.3.007-038.

14. Антонова Н.Е., Ломакина Н.В., Файман А.Д. *Природно-ресурсный сектор Дальнего Востока России: «проклятие» или локомотив развития?* Хабаровск: Институт экономических исследований Дальневосточного отделения РАН; 2022: 336. EDN: HDWXXB.

15. Волотковская Н.С., Семенов А.С., Бебихов Ю.В. и др. Перспективы развития энергетического комплекса Северо-Востока России. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021; 23(3): 58-69. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69.

References

1. Savvinov G.N., Makarov V.S., Velichenko V.V. Ecosystems of the Yakut Arctic: Modern Challenges and Threats. *Problems of Regional Ecology*. 2023;2:63–73 (in Russian). DOI:10.24412/1728-323X-2023-2-63-73.

2. Astakhova I.S. Attitude of the population to the industrial development of the territories of traditional residence of the indigenous peoples of the North (based on the materials of ethnological examinations in the Sadyn nasleg of the Sakha Republic (Yakutia)). *The Arctic and the North*. 2024;55:97–115 (in Russian). DOI:10.37482/issn2221-2698.2024.55.97.

3. Bessonova T.N. Evolution of the development of northern raw material territories. *Bulletin of Yugra State University*. 2016;4(43) 41–48 (in Russian). EDN: XHNLKP.

4. Arkhipova Y.A. Development of Georesources of the Russian Far East: Aspects of the Current Period and Development Prospects. *Mining Journal*. 2024; 6:21–26 (in Russian). DOI:10.17580/gzh.2024.06.03.

5. Burtseva E.I., Sleptsov A.N., Bysyina A.N. Industrial development of the territories of the Arctic zone of Yakutia and ethnological expertise of investment projects. *Arctic and North*. 2023;51:52–72 (in Russian). DOI:10.37482/issn2221-2698.2023.51.52.

6. Nikiforova V.V. Assessment of the potential for sustainable development of the mining industry in the northern regions of the resource type. *The Arctic XXI Century. Humanities*. 2022;4(30):57–76 (in Russian). DOI: 10.25587/SVFU.2022.35.20.005.

7. Nikonorov S.M., Egorova A.I., Grigoryeva E.E. Impact of industrial development of the northern regions on water resources: a forecast model on the example of the Republic of Sakha (Yakutia). *Industrial Economics*. 2025;18(4):529–543 (in Russian). DOI: 10.17073/2072-1633-2025-4-1536.

8. Egorova A.I., Grigoryeva E.E. Use of water resources in the northern territories of Yakutia for industrial development: A forecast model. *BIO Web of Conferences*. 2025;194:01022 (in Russian). DOI:10.1051/bioconf/202519401022.

9. Nikonorov S.M., Papenkov K.V., Khovavko I.Yu., Egorova A.I. Approaches to the ecological and economic assessment of decoupling (on the example of virtual water trade). *Problems of the Modern Economy*. 2024;4(92):220–222 (in Russian). EDN: PNOVTP.

10. Batugina N.S., Barashkova A.S., Gulyaev P.V., et al. *Stability of the spatial organization of socio-economic systems of the northern regions of the resource type*. Yakutsk: Ammosov North-Eastern Federal University; 2022:298 (in Russian).

11. Egorov E.G., et al. *South Yakutia: Potential and Territorial Organization of the Economic Complex*. St. Petersburg: Polytech University; 2013:308 (in Russian).

12. Kryukov Y.V. Directions of Transformation of the Resource Sector of the Republic of Sakha (Yakutia) in the Latest Conditions. *Vestnik of NEFU. Economics. Sociology. Culturology*. 2023;2(30):7–16 (in Russian). DOI:10.25587/SVFU.2023.77.53.001.

13. Kryukov V.A., Kryukov Y.V. Neoindustrialization: towards a “new geometry” of economic spatial interactions. *Spatial Economics*. 2024;20(3):7–38 (in Russian). DOI: 10.14530/se.2024.3.007-038.

14. Antonova N.E., Lomakina N.V., Faiman A.D. *The Natural Resource Sector of the Russian Far East: A “Curse” or a Locomotive of Development?* Khabarovsk: Institute of Economic Research of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2022:336 (in Russian). EDN: HDWXXB.

15. Volotkovskaya N.S., Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., et al. Prospects for the development of the energy complex of the North-East of Russia. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Energy*. 2021;23(3):58–69 (in Russian). DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69.

Об авторах

ГРИГОРЬЕВА Елена Эдуардовна – кандидат экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института региональной экономики Севера, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Якутск, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-9801-7238, ResearcherID: G-9871-2019, Scopus Author ID: 57188761072, SPIN: 3506-6360, e-mail: elena.grigoreva80@mail.ru

ЕГОРОВА Ангелина Игоревна – кандидат экономических наук, техник кафедры экономики устойчивого развития и природопользования ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», старший научный сотрудник Научно-исследовательского института региональной экономики Севера, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Якутск, Российская Федерация. ORCID: 0000-0002-7675-4680, ResearcherID: LQK-3520-2024, Scopus Author ID: 60214417300, SPIN: 9435-8056, e-mail: snp077@yandex.ru

About the authors

GRIGORYEVA Elena Eduardovna – Cand. Sci. (Economic), Associate Professor, Leading Researcher at the Research Institute of Regional Economy of the North, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-9801-7238, ResearcherID: G-9871-2019, Scopus Author ID: 57188761072, SPIN: 3506-6360, e-mail: elena.grigoreva80@mail.ru.

EGOROVA Angelina Igorevna – Cand. Sci. (Economic), Technician, Department of Economics of Sustainable Development and Environmental Management, Lomonosov Moscow State University; Senior Researcher, Research Institute of Regional Economics of the North, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7675-4680, ResearcherID: LQK-3520-2024, Scopus Author ID: 60214417300, SPIN: 9435-8056, e-mail: snp077@yandex.ru.

Вклад авторов

Григорьева Е.Э. – разработка концепции, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования

Егорова А.И. – методология, программное обеспечение, проведение статистического анализа

Authors' contribution

Grigoryeva E.E. – conceptualization, investigation, resources

Egorova A.I. – methodology, software, formal analysis

Конфликт интересов

Григорьева Е.Э. является членом редакционного совета журнала «Экономика и природопользование на Севере». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Conflict of interests

E.E. Grigoryeva is a member of the editorial board of the journal “Economy and Nature Management in the North.” The authors are not aware of any other potential conflict of interest related to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 23.07.2026

Поступила после рецензирования / Revised 02.09.2026

Принята к публикации / Accepted 21.09.2026