

Влияние антропогенных факторов на изменение климата городов Арктической зоны Российской Федерации на примере Республики Коми

Анна Евгеньевна Коробейникова, Алина Андреевна Сокольникова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день изменение климата в Арктической зоне является важной проблемой для мирового сообщества. Будучи крупнейшей страной в мире, Российская Федерация особенно уязвима к последствиям изменения климата из-за своей обширной территории, сложных климатических условий и особенностей географического положения. Цель исследования — анализ влияния антропогенных факторов на изменение климата в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) на примере Республики Коми и разработка решений для смягчения его негативных последствий.

Материалы и методы. Инструментами для оценки влияния антропогенных факторов на изменение климата в Республике Коми являются: пространственное ГИС-моделирование, аналитический метод, статистический анализ данных и картографирование. На основе этих методов исследования создается пространственная модель для выявления наиболее подверженных изменению климата районов.

Результаты. Разработанная методика позволяет определить урбанизированные территории АЗРФ, наиболее подверженные показателям изменения климата. Проведен анализ территории по количеству выбросов основных парниковых газов: углекислого газа (CO₂), метана (CH₄), оксида азота (NO_x). Проектный эксперимент произведен на примере Республики Коми. Приведен пример решения проблемы для снижения показателей по изменению климата АЗРФ.

Выводы. Выявлена необходимость принятия мер для снижения антропогенного воздействия на климатические изменения в Республике Коми. Результаты данного исследования могут быть полезными для принятия решений в области климатической политики на региональном и национальном уровнях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изменение климата, антропогенные факторы, АЗРФ, жизнестойкий город, Крайний Север, Республика Коми, ГИС-моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коробейникова А.Е., Сокольникова А.А. Влияние антропогенных факторов на изменение климата городов Арктической зоны Российской Федерации на примере Республики Коми // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.10

Автор, ответственный за переписку: Анна Евгеньевна Коробейникова, anna-chega@mail.ru.

The influence of anthropogenic factors on climate change in the cities of the Russian Arctic, using the example of the Komi Republic

Anna E. Korobeinikova, Alina A. Sokolnikova
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Today, climate change in the Arctic zone is an important problem for the world community. As the largest country in the world, the Russian Federation is particularly vulnerable to the effects of climate change due to its vast territory, difficult climatic conditions and geographical location. The purpose of this study is to analyze the impact of anthropogenic factors on climate change in the Arctic zone of the Russian Federation, using the example of the Komi Republic, and to develop solutions to mitigate its negative consequences.

Materials and methods. Tools for assessing the impact of anthropogenic factors on climate change in the Komi Republic are: spatial GIS modelling, analytical method, statistical data analysis and mapping. Based on these research methods, a spatial model is being created to identify the areas most susceptible to climate change.

Results. The developed methodology makes it possible to identify the urbanized territories of the Russian Arctic that are most susceptible to climate change indicators. The territory was analyzed by the amount of emissions of the main greenhouse gases carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrogen oxide (NO_x). The design experiment was carried out using the exam-

ple of the Komi Republic. An example of applying a solution to the problem to reduce climate change indicators in the Arctic zone of the Russian Federation is given.

Conclusions. The necessity of taking measures to reduce the anthropogenic impact on climate change in the Komi Republic has been identified. The results of this article can be useful for decision-making in the field of climate policy at the regional and national levels.

KEYWORDS: climate change, anthropogenic factors, Russian Arctic, resilient city, Far North, Komi Republic, GIS modelling

FOR CITATION: Korobeinikova A.E., Sokolnikova A.A. The influence of anthropogenic factors on climate change in the cities of the Russian Arctic, using the example of the Komi Republic. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):10. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.10

Corresponding author: Anna E. Korobeinikova, anna-chega@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление климата, связанное, в первую очередь, с антропогенными выбросами парниковых газов, в течение последних десятилетий является общемировой тенденцией. Изменения климата подтверждаются на глобальных климатических моделях CMIP, служащих основой для современного анализа перемены климата. Информация CMIP, особенно новейшие сведения модели CMIP6, критически важна для формирования прогнозов и последствий трансформации климата. Тем не менее, несмотря на развитие климатического моделирования, в настоящее время ощущается нехватка специализированных градостроительных методик для оценки последствий изменения климата в городах и регионах.

Одним из наиболее наглядных показателей климатических перемен служит температура воздуха.

Рост среднегодовой температуры над сушей в период 1976–2020 гг. повышается на 0,179 °C каждое десятилетие [1–3]. Для подтверждения этого тезиса авторами составлены графики изменения температуры по данным, полученным из Earth Engine Data Catalog за последние три десятилетия (рис. 1).

Россия — единственная страна, где граница Арктики закреплена законодательно, указом Президента Российской Федерации выделена Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ). АЗРФ охватывает 9 регионов: четыре относятся к ней полностью: Мурманская область, Ненецкий автономный округ (далее — АО), Чукотский АО, Ямало-Ненецкий АО; пять частично: Республика Коми, Республика Карелия, Республика Саха (Якутия), Архангельская область, Красноярский край. Четыре приарктических региона включают в себя: Ханты-Мансийский АО — Югра, Камчатский край, Магаданская область. Площадь ар-

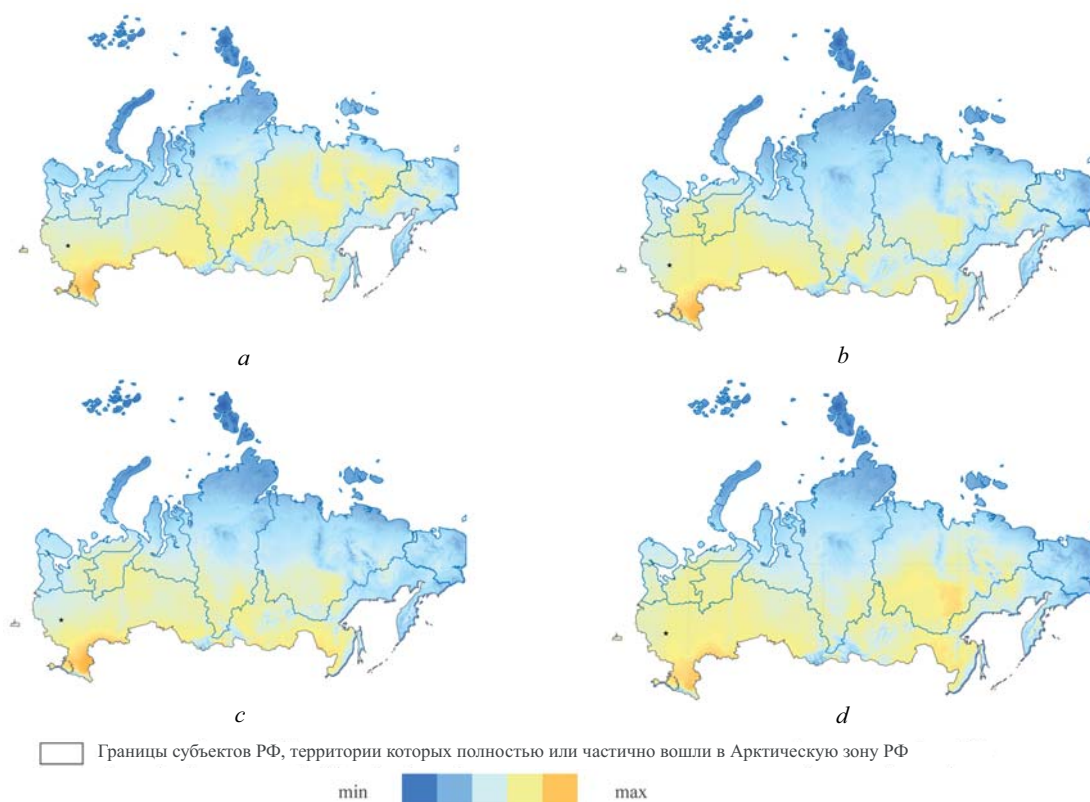


Рис. 1. Метеорологические данные Российской Федерации: а — 1991 г.; б — 2000 г.; в — 2015 г.; д — 2022 г. (по информации Earth Engine Data Catalog)

ктических территорий — 4,8 млн км² (28 % территории страны). Здесь проживает 2,6 млн человек, больше половины населения мировой Арктики.

На основе информации российских статистических ежегодников Федеральной службы государственной статистики проведен анализ среднемесячной температуры воздуха и количество осадков по регионам РФ. В 2020 г. произошел резкий скачок роста CH₄, что может свидетельствовать о наиболее значительном повышении температуры, которое было отмечено на всей территории АЗРФ:

- средняя фактическая температура января составляла −16,5 °С, отклонение от нормы 6,4 °С. Наибольшее отклонение от нормы в 2020 г. заметно в Северо-Западном федеральном округе (СЗФО), это 6,8 °С (рис. 2, а);
- средняя фактическая температура июля — 14,7 °С, отклонение от нормы — 1,3 °С (рис. 2, б). Наибольшее отклонение от нормы также присутствует в СЗФО и составляет 2,1 °С;
- среднее количество осадков в июле 2003 г. — 69,5 мм, в 2020 г. — 62,3 мм (рис. 2, с);
- сравнивая графики среднемесячных показателей по регионам АЗРФ, можно прийти к выводу, что количество осадков прямо пропорционально температуре воздуха: чем теплее температура воздуха, тем большее количество осадков выпадает на поверхность Земли (рис. 2).

Анализ изменений температуры и осадков в период 2003–2022 гг. позволяет сделать вывод, что при-

чиной ускоренного в эти годы сокращения ледников является увеличение летней температуры воздуха с начала XXI в. на 1,5 °С и, в первую очередь, охватывает изменения на территории СЗФО. Последствия глобального потепления ощущаются не только в Арктическом регионе, но и далеко за его пределами [4–6].

Рост уровня парниковых газов начал ускоренно идти вверх после возобновления объема производства промышленности страны в 1926 г. и до 1990 г. (рис. 3). Одним из наиболее важных парниковых газов является диоксид углерода, такие газы, как метан и закись азота, также имеют влияние на глобальное потепление [7–9]. На рис. 3 отображены суммарные выбросы по трем парниковым газам. На графиках, основанных на данных OurWorldinData.org, выделен период 1930–1990 гг., где наблюдается продолжительный рост уровня парниковых газов (рис. 3, 4).

По сведениям Росгидромета рост концентрации парниковых газов на территории России в 2022 г. стал рекордным, в первую очередь углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄). Концентрация углекислого газа на территории РФ в 2022 г. возрастает по сравнению с 2020 и 2021 г. (рис. 3).

Вторая по значимости причина глобального потепления после углекислого газа — метан (CH₄) — бесцветный газ без запаха. С 1750 г. люди увеличили количество метана в атмосфере примерно на 150 %. Добыча ископаемых видов топлива, таких как нефть, газ и уголь, является крупнейшим источником выбро-

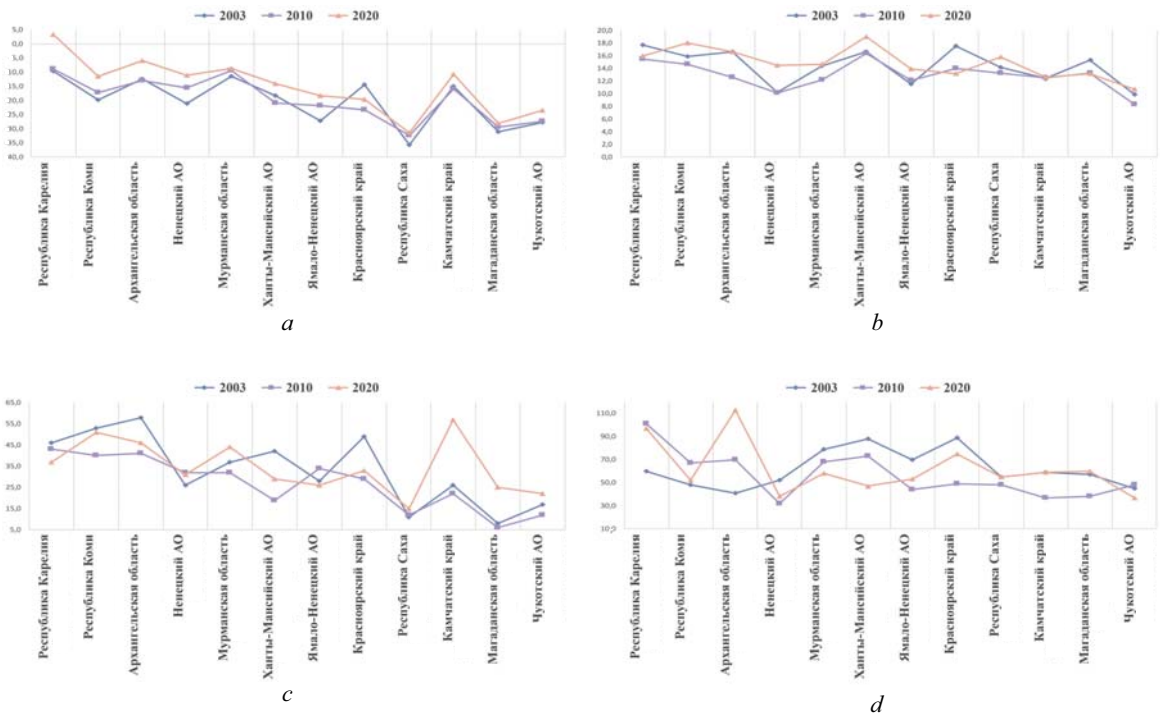


Рис. 2. Среднемесячные показатели по регионам АЗРФ: а — среднемесячная температура воздуха (январь); б — среднемесячная температура воздуха (июль); с — среднемесячное количество осадков (январь); д — среднемесячное количество осадков (июль) (российские статистические ежегодники Федеральной службы государственной статистики и Microsoft Excel)

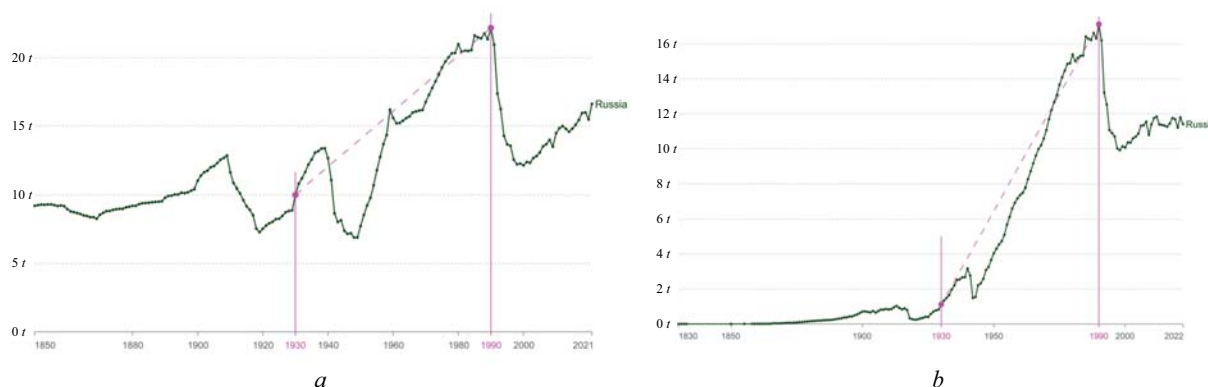


Рис. 3. Выбросы парниковых газов CO_2e по категориям (a); выбросы на душу населения CO_2 (b) (источники: OurWorldinData.org и Adobe Illustrator)

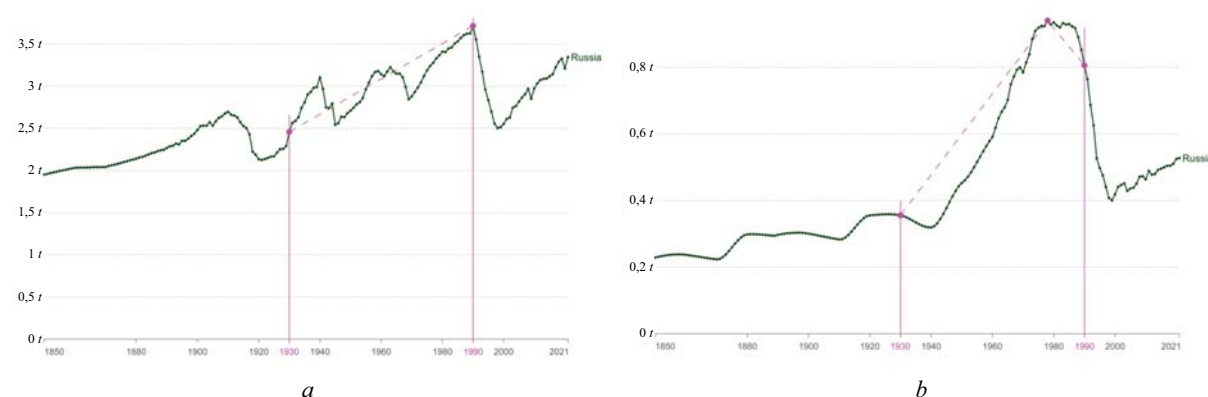


Рис. 4. Выбросы парниковых газов на душу населения: a — CH_4 ; b — NO_x (источники: OurWorldinData.org и Adobe Illustrator [13])

сов метана. Люди также увеличили выбросы метана из-за интенсивных методов ведения сельского хозяйства, животноводства и удаления отходов [10, 11].

Парниковые газы, такие как метан, остаются в атмосфере Земли, позволяя солнечному свету проходить через нее, но задерживая тепло [12, 13]. Одно недавнее исследование показало, что быстрое сокращение выбросов метана может замедлить скорость потепления Земли на 30 %. В 2020 г. среднегодовая концентрация метана на душу населения составляла 3,21 т, после чего произошел скачок до 3,35 т в 2021 г. (рис. 4, a).

Растущий спрос со стороны сельского хозяйства, транспорта, промышленности и энергетики привел к резкому росту уровней азотного загрязнения и связанных с ним выбросов парниковых газов [14]. Выбросы закиси азота (NO_x) от промышленности и сжигания, например, в 300 раз мощнее, чем CO_2 как парникового газа (рис. 4, b).

Метан и другие углеводороды в природном газе соединяются с оксидами азота, образуя озоновое загрязнение атмосферы (рис. 5) [15, 16]. На значительной части страны сохраняется тенденция уменьшения продолжительности залегания снежного покрова, при этом наблюдается увеличение максимальной

за зиму высоты снежного покрова на большей части страны. В процессе таяния многолетней мерзлоты, занимающей 63 % территории России, высвобождаются накопившиеся в замерзшей органике парниковые газы, в частности углекислый газ CO_2 и более агрессивный по воздействию на климат метан CH_4 [17–19]. Зона вечной мерзлоты активно осваивается благодаря запасам полезных ископаемых, но влияние температурных изменений влечет за собой серьезные последствия для инфраструктуры регионов Севера, что негативно скажется на зданиях и впоследствии приведет к их разрушению [20, 21].

Рост концентрации парниковых газов и современное потепление климата на всей территории земного шара непосредственно связаны с проблемой антропогенного воздействия [22, 23]. Хозяйственная деятельность человечества — использование природных ресурсов, существенное сокращение площади лесной поверхности, отсутствие ее возобновления, а в связи с этим заболачивание территорий, рост промышленных и городских территорий — все это повышает концентрацию парниковых газов и тем самым усиливает парниковый эффект, что приводит к росту среднегодовой температуры приземного слоя атмосферы.

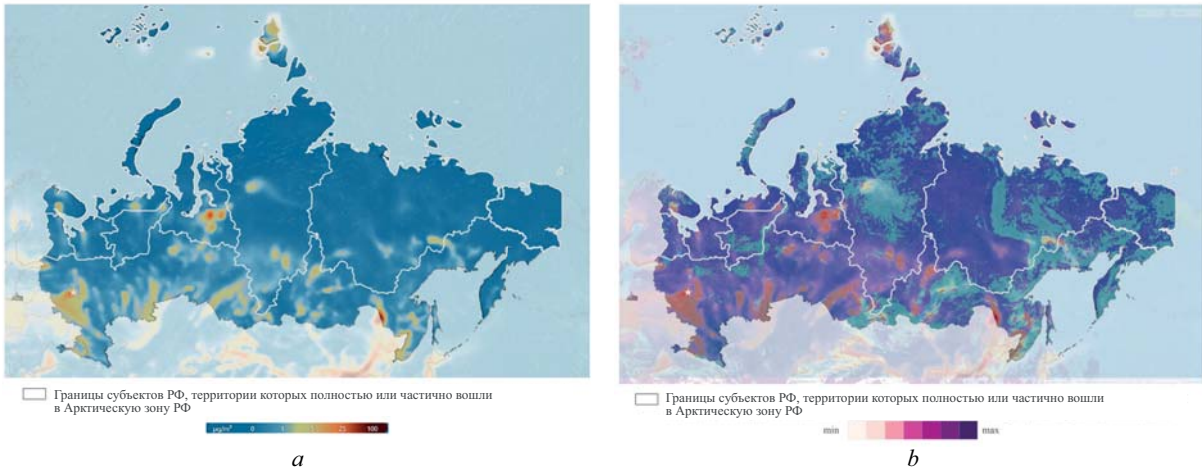


Рис. 5. Концентрация природных газов на территории Российской Федерации: *a* — NO_x ; *b* — $\text{NO}_x + \text{CH}_4$ (источники: Earth Engine Data Catalog и Adobe Illustrator)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Антропогенные факторы — это совокупность группы факторов, прямо или косвенно связанных с деятельностью человечества, влияющих на изменение и функционирование окружающей среды. Основным драйвером современного потепления является продолжающийся рост концентраций CO_2 , CH_4 , оксида азота NO_x (рис. 6).
Классификация ключевых антропогенных источников выбросов парниковых газов может бази-

роваться на различных критериях, таких как тип деятельности, масштабы или прямые и косвенные источники:
1) прямые источники:
• электростанции (особенно те, которые используют ископаемое топливо);
• угольные шахты (выбросы метана в процессе добычи);
• полигоны ТБО (метан от разложения органических отходов);

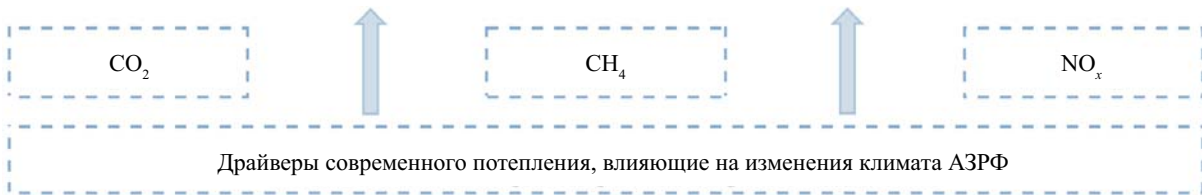


Рис. 6. Основные драйверы современного потепления

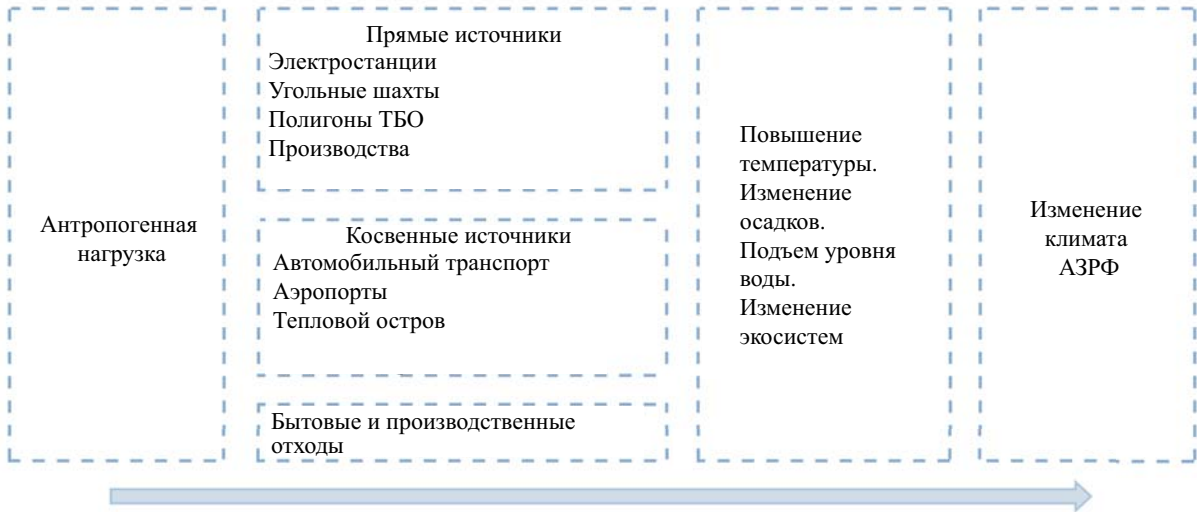


Рис. 7. Теоретическая модель влияния антропогенной нагрузки на изменение климата

- производства (зависит от отрасли, многие производства выбрасывают CO_2 и другие газы);
- 2) косвенные источники:
 - автомобильный транспорт (выбросы от сгорания топлива);
 - аэропорты (включают в себя как выбросы от самолетов, так и от сопутствующей инфраструктуры);
 - тепловой остров (не является источником в прямом смысле, но способствует повышению температуры и, как следствие, увеличению энергопотребления);
- 3) бытовые и производственные отходы:
 - могут быть источником как прямых, так и косвенных выбросов в зависимости от способа обращения с отходами и их переработки.

Влияние антропогенных факторов на изменение климата окружающей среды:

- повышение температуры;
- изменение осадков;
- подъем уровня воды;
- изменение экосистем.

На основе классификации основных антропогенных факторов разработана теоретическая модель влияния антропогенной нагрузки на изменение климата (рис. 7).

Для анализа исследуемой территории по количеству выбросов парниковых газов необходимо рассматривать территорию региона составными частями, в нашем случае по муниципальным районам. Инструментами для создания модели наиболее изменчивых территорий, подверженных изменению климата, являются:

- пространственное ГИС-моделирование позволяет изучать пространственные данные, включая распределение выбросов газов на территории;
- аналитический метод применяется для выявления закономерностей и трендов в сведениях о климате и выбросах;

- статистический анализ данных дает возможность оценить степень влияния различных факторов на выбросы парниковых газов;
- картографирование.

Исследование включает четыре ключевых этапа, приведенных на рис. 8.

Первый этап представляет собой сбор информации по изменению климата в регионе за последние десятилетия: метеорологические сведения, количество осадков, климат отдельной точки, вызванный эффектом острова тепла (Urban Heat Island, UHI).

На втором этапе методом картографического анализа выявляются места наиболее опасных отходов, что также влияет на биоразнообразие природы. Также определяются места расположения главных источников техногенного воздействия и выгружаются данные Climate Trace для установления местоположения крупных источников и оценки количественных выбросов в течение времени.

На третьем этапе для отдельного муниципального района требуется рассчитать суммарное количество выбросов по трем парниковым газам CO_2 , CH_4 , NO_x , учитывающих типы основных источников загрязнения. Этот анализ проводится при помощи программного обеспечения QGIS на основе открытой базы данных крупных источников выбросов Climate Trace. Сведения Climate Trace выгружаются в таблицу атрибутов по каждому из муниципальных районов с набором ввода данных: наименование границы административно-территориального деления (АДТ), основного фактора источника загрязнения и суммарное количество выбросов.

Четвертый этап представляет собой пространственное ГИС-моделирование. На базе информации атрибутов с помощью метода кластеризации данных составляется схема районов, наиболее подверженных изменению климата по градации цветов: от светлого к темному, соответственно от незначительного к наи-

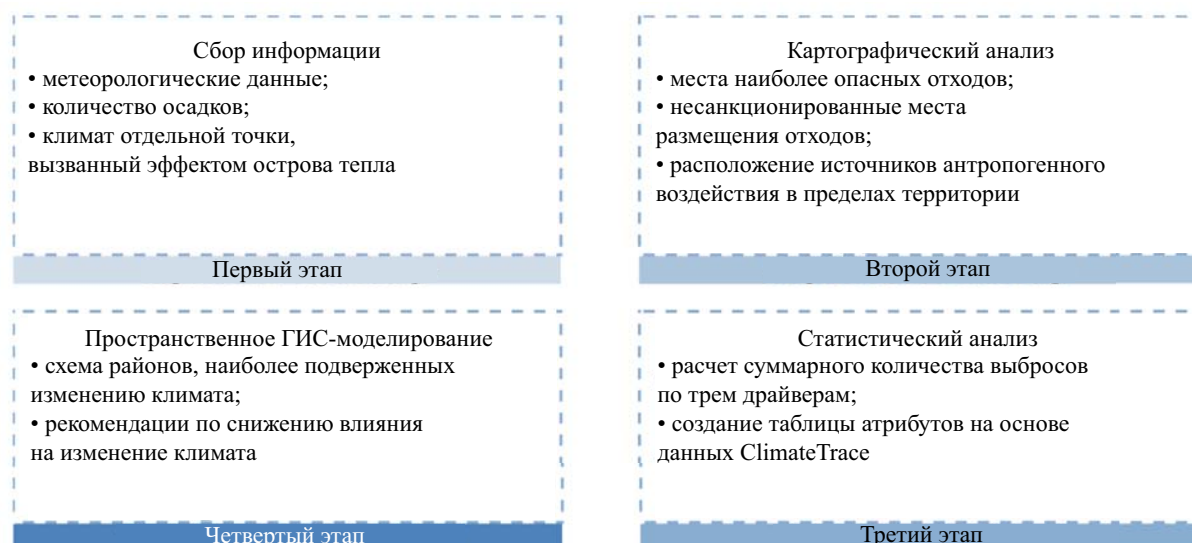


Рис. 8. Этапы исследования выявления влияния антропогенных факторов на территорию

большему выбросу парниковых газов. Также на этом этапе полученной модели составляются предложения по адаптации территории, направленные на организацию мероприятий для снижения выбросов парниковых газов на территории исследования.

Разработанные этапы исследования позволят проанализировать влияние антропогенных факторов на изменение климата Арктической зоны Российской Федерации и подготовить рекомендации для смягчения его негативных последствий. Построенная схема анализа районирования даст возможность наглядно показать территории выбросов основных крупных источников.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для апробации теоретических исследований была выбрана территория Республики Коми. Рассматриваемая территория расположена на северо-востоке европейской части России и входит в СЗФО (рис. 9). Согласно Постановлению Правительства РФ от 16.11.2021 № 1946 к районам Крайнего Севера Республики Коми относятся городские округа: Воркута, Инта, Усинск; муниципальные районы: Усть-Цилемский, Ижемский, Печора; к местностям, приравненным к районам Крайнего Севера: Сыктывкар, Ухта, Вуктыл; муниципальные районы: Княжпогостский, Койгородский, Корткеросский, Прилузский, Сыктывдинский, Сосногорск, Сысольский, Троицко-Печорский, Удорский, Усть-Вымский, Усть-Куломский [2].

Первый этап представляет собой сбор информации: метеорологических данных, количества осадков и климата отдельной точки, вызванных эффек-

том острова тепла. Географическое положение Республики Коми в относительно высоких широтах, удаленность ее от теплого Атлантического океана и близость обширного Азиатского континента обуславливают в республике умеренно-континентальный климат, значительно отличающийся от климата остальной территории Европы. Большая протяженность республики с севера на юг 785 км, с юго-запада на северо-восток 1275 км, с запада на восток 695 км, а также разнообразие физико-географических условий создают существенную разницу в климате отдельных ее районов.

С помощью геопространственной платформы спутниковых снимков Earth Engine Data Catalog продукта набора данных Terra Climate о ежемесячном климате и климатическом водном балансе для глобальных наземных поверхностей составлены схемы метеорологических данных территории Республики Коми за период 1991–2022 г. (рис. 10). Как и в других регионах Арктики, Республика Коми сталкивается с повышением среднегодовой температуры. За последние десятилетия установился тренд на увеличение температур в разных сезонах, особенно заметное в зимние месяцы.

Стандартизированная база данных по осадкам SPEIbase каталога данных Earth Engine составлена на основе схемы за промежуток 1991–2022 г. за временную шкалу SPEI в 12 месяцев. Отмечается рост годового количества осадков (рис. 11). В последние 30 лет температура увеличилась на 0,8–1,5 °C, в результате чего граница мерзлоты, залегающей с поверхности, отступила к северу на 30–50 км.

Климат отдельной точки определяется свойствами городской среды в ее окрестностях не толь-



Рис. 9. Республика Коми в системе расселения Российской Федерации (источник: QGIS и Adobe Illustrator)

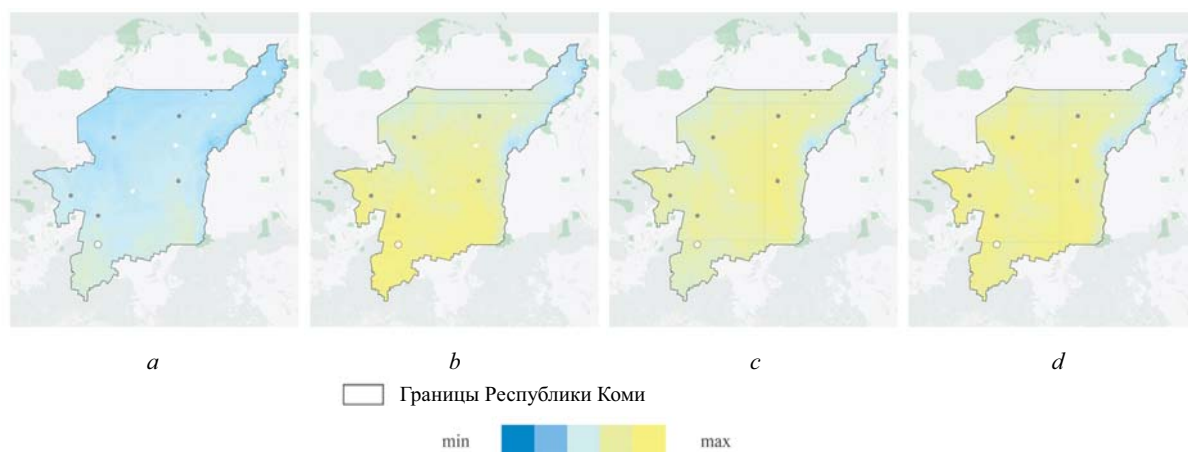


Рис. 10. Метеорологические данные территории Республики Коми: *a* — 1991 г.; *b* — 2000 г.; *c* — 2015 г.; *d* — 2022 г. (источник: Earth Engine Data Catalog и Adobe Illustrator)

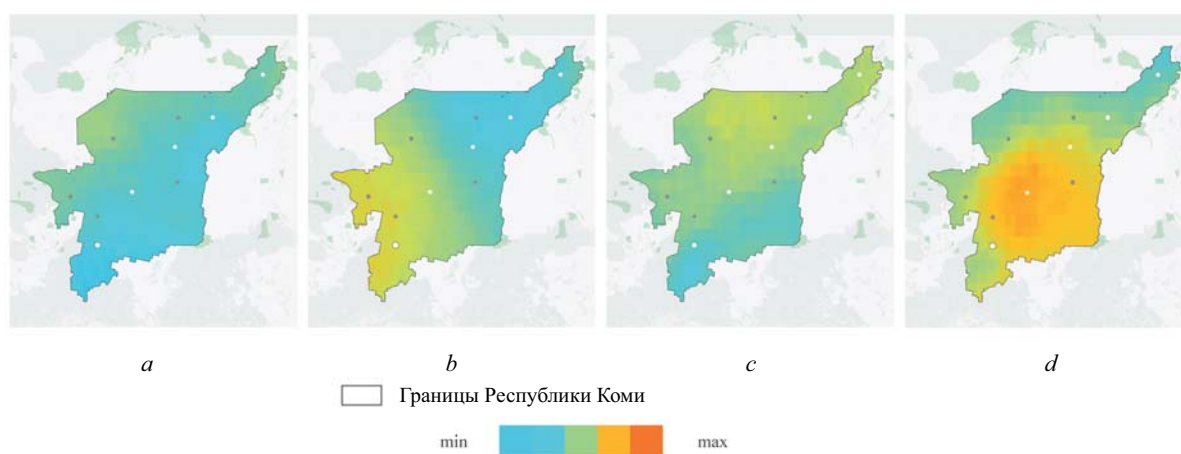


Рис. 11. Количество осадков на территории Республики Коми: *a* — 1991 г.; *b* — 2000 г.; *c* — 2015 г.; *d* — 2022 г. (источники: Earth Engine Data Catalog и Adobe Illustrator)

ко на локальном масштабе (в радиусе первых сотен метров), но и на мезомасштабе (в радиусе до 10 км). Это связано с тем, что тепловые эффекты небольших однородных участков аккумулируются и переносятся воздушными потоками над городом. В результате формируется мезомасштабный остров тепла, который выражен наиболее ярко в центральных районах городов, но за счет атмосферного переноса может распространяться к окраинам мегаполиса и даже в пригороды. Эффект острова тепла имеет место быть и в Республике Коми, хотя масштаб его проявления может быть намного меньше по сравнению с большими городами.

С помощью набора данных Earth Engine о глобальных изменениях человека CSP gHM составлена схема совокупного показателя изменения человеком земной поверхности, который рассчитывается путем оценки доли измененного местоположения (пикселя). Республика Коми обладает низкой плотностью населения и по большей части состоит из природных ландшафтов, включая леса, равнины и различные водные ресурсы. Из-за этого в регионе не наблюдается

ярко выраженного эффекта острова тепла, который обычно возникает в городских районах с высокой плотностью застройки и использованием асфальтированных поверхностей (рис. 12).

Также была составлена схема искусственной засветки неба на основе спутниковых данных Light Pollution Map (World Atlas 2015). Исходя из рис. 13, можно сделать вывод, что засветку неба представляют собой не только населенные пункты.

На основе данных Light Pollution Map (World Atlas 2015) и каталога energybase нефтяных и газовых месторождений в программе Illustrator произведено наслаивание двух схем, исходя из чего можно сделать вывод, что засветка неба имеет географическую протяженность активных нефтяных месторождений, выявленных их электрическим светом, а также свет и тепло, выделяемые при сжигании природного газа (рис. 14). Горящий природный газ первоначально растворялся в сырой нефти и выходит из раствора во время производства. Буровые компании сжигают его на факеле, потому что газ неудобно или невыгодно использовать на буровой площадке, или потому что его

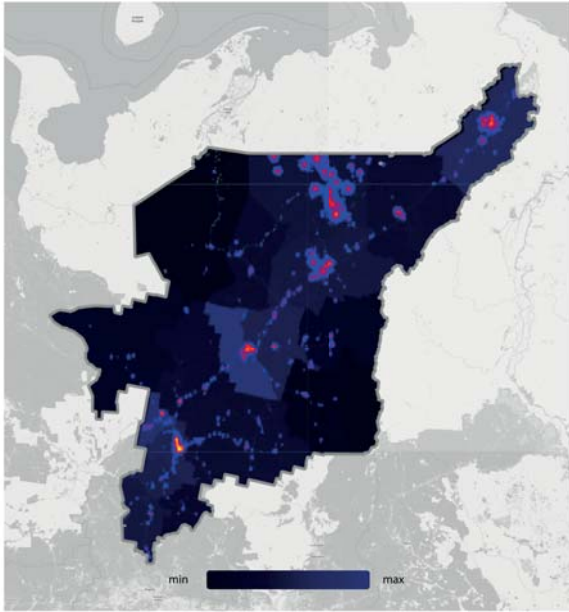


Рис. 12. Плотность и размещение населения Республики Коми (источники: Earth Engine Data Catalog и Adobe Illustrator)

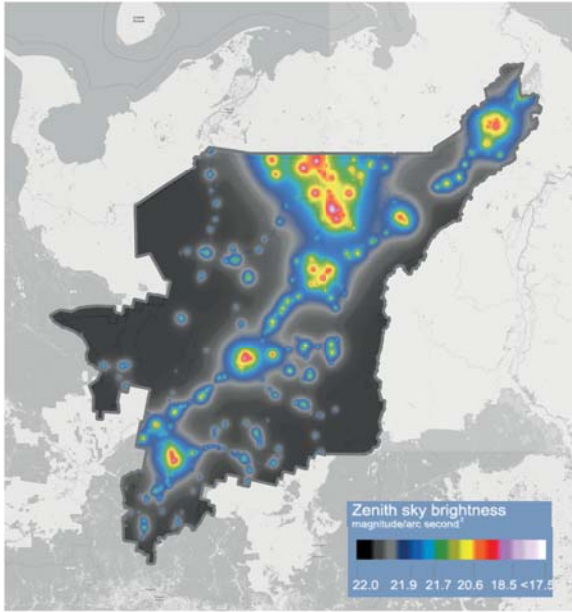


Рис. 13. Атлас искусственной засветки неба на основе спутниковых данных (источники: Light Pollution Map и Adobe Illustrator)

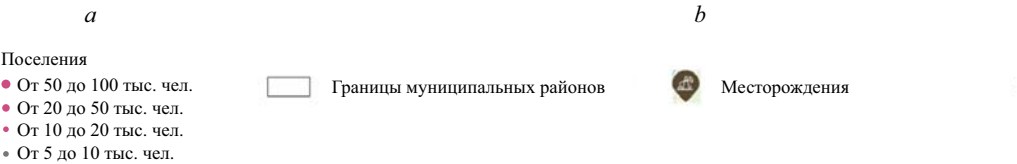
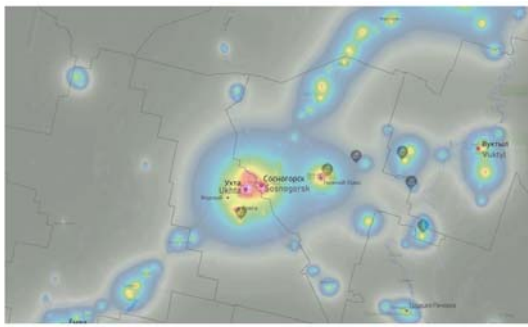
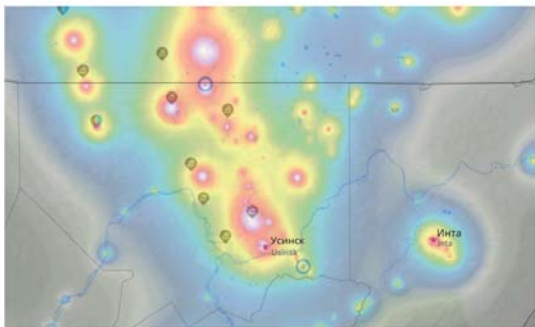


Рис. 14. Засветка неба + месторождения на примере: *a* — Усинского района; *b* — Ухтинского района (источники: Light Pollution Map, energybase и Adobe Illustrator)

доставка на рынок обходится дорого. Эта практика производит большую вспышку горящего газа, который освещает окружающую область и выпускает высокую температуру и загрязнение в атмосферу.

На втором этапе с помощью данных материалов анализа территориальной схемы с отходами были составлены схемы мест накопления опасных отходов и выявлены несанкционированные места размещения отходов, расположенные на землях лесного фонда (рис. 15, 16). Среди 11 регионов СЗФО Республика Коми занимаем 5-е место по количеству образующихся отходов. Основной вклад в образование отходов, вредных как природе, так и человеку, вносят предприятия по добыче полезных ископаемых и обраба-

тывающие производства, так как Республика Коми является одной из крупнейших энергосырьевых баз на северо-западе России, в частности угля, дерева и нефти. Главные отрасли промышленности с высоким образованием отходов — угледобывающая (ОАО «Воркутауголь», ОАО «Шахта Интауголь»), нефтедобывающая (ОАО «Комнедра», ОАО «Северная нефть», ОАО «Енисей») и деревообрабатывающая (ОАО «Монди СППК»). В процентном соотношении этим предприятиям принадлежит образование 80 % отходов и области загрязнения не ограничиваются лишь землей. Отходы, не подлежащие использованию и переработке, направляются в места хранения и захоронения (рис. 17).

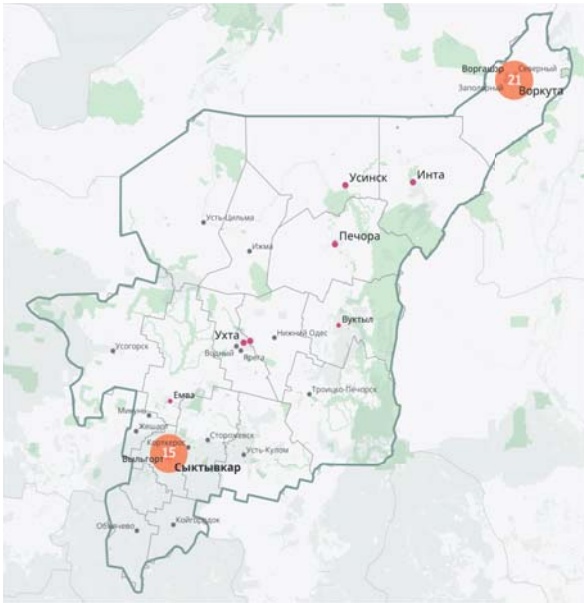


Рис. 15. Места накопления опасных отходов (источники: QGIS и Adobe Illustrator)

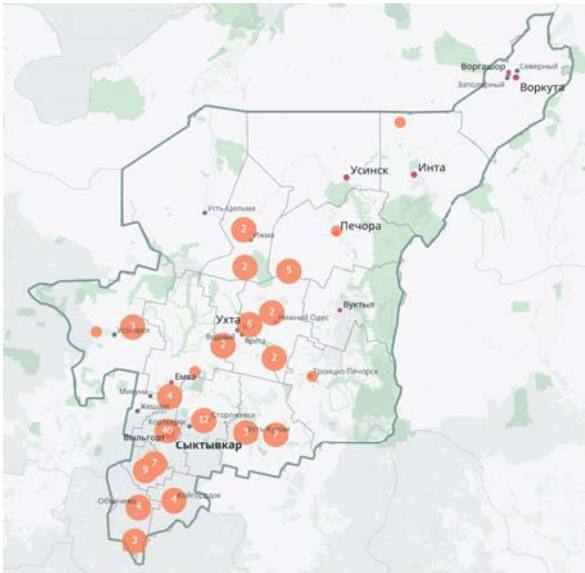


Рис. 16. Несанкционированные места размещения отходов, расположенных на землях лесного фонда (источники: Source: QGIS и Adobe Illustrator)

Также на основе данных QGIS выявлены места расположения основных источников техногенного воздействия: производства и месторождения полезных ископаемых (рис. 17). Для подсчета количества выбросов парниковых были выгружены данные Climate Trase, основанные на спутниках, методах дистанционного зондирования и обученном алгоритме искусственного интеллекта. Подробный обзор глобальных выбросов позволил определить местоположение крупных источников и оценить количественные оценки вы-

бросов в течение времени (рис. 18). Исходя из этого можно сделать вывод, что между показателями первого этапа исследования, местами накопления отходов, а также расположения источников техногенного воздействия и количества выбросов основных крупных (источник Climate Trase) проводится взаимосвязанный анализ объектов выбросов антропогенных факторов.

Третьим этапом производится статистический анализ по выбросам парниковых газов на территории республики Коми, включая углекислый газ CO₂,

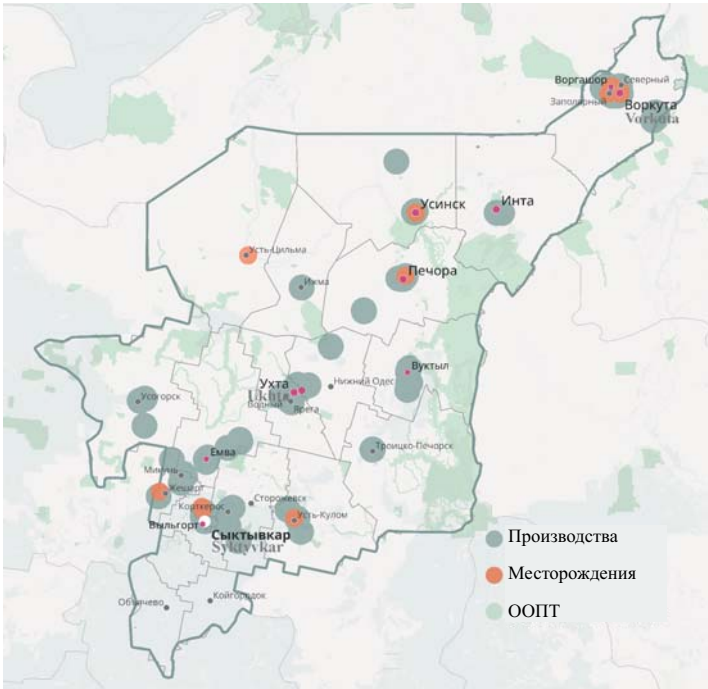


Рис. 17. Анализ расположения источников техногенного воздействия (источники: QGIS и Adobe Illustrator)

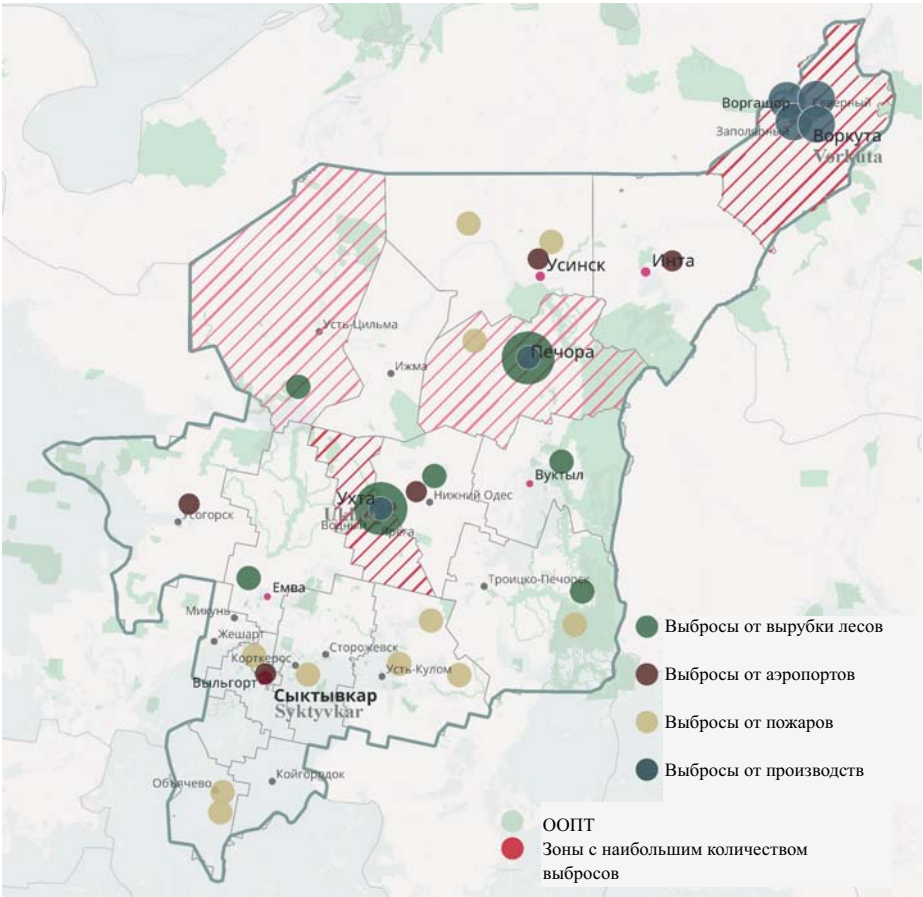


Рис. 18. Количество выбросов основных крупных источников (источники: Climate Trace и Adobe Illustrator)

оксиды азота NO_x и метан CH_4 , которые оказывают значительное влияние на окружающую среду и климат региона.

На основе информации Climate Trace составлена таблица атрибутов по трем парниковым газам с наименованием источника загрязнения и его расположением в пределах региона, а также суммарным количеством выбросов каждого из парниковых газов как по отдельному источнику загрязнения, так

и по району, и по всему региону Республики Коми. Из таблицы можно видеть, что наибольшее количество выбросов по трем парниковым газам приходится на территорию Арктической зоны Республики Коми.

На четвертом этапе составляется схема пространственного ГИС-моделирования на базе трех основных загрязняющих веществ: углекислый газ CO_2 , оксиды азота NO_x и метан CH_4 с учетом степени их влияния на здоровье человека и окружающую среду. Данные

Количество выбросов загрязняющих веществ Source: ClimateTrace и Microsoft Excel

Наименование АДТ	Источник загрязнения	CO_2	CH_4	NO_2	CO_2e
		т			
Городской округ Сыктывкар	Аэропорт (внутренний)	34 391,6	0,24	0,96	34 392,8
	Аэропорт (зарубежный)	1344,79	0,01	0,04	1344,84
	Автомобильный транспорт	72 867,7	2,39	1,88	72 871,97
	Электростанция	2 175 000	—	—	2 175 000
	Полигон ТБО	—	3128,02	—	3128,02
	Бытовые и производственные отходы (сточные воды)	—	61,08	39,43	100,51
	Итого	2 283 604,09	3191,74	42,31	2 286 838,14
Сыктывдинский район	Автомобильный транспорт	11 017	0,36	0,28	11 017,64
	Итого	11 017	0,36	0,28	11 017,64

Продолжение табл.

Наименование АДТ	Источник загрязнения	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO _{2e}
		т			
Городской округ Воркута	Аэропорт	1190,59	0,01	0,03	1190,63
	Воргашорская угольная шахта	–	61 303,5	–	61 303,5
	Комсомольская угольная шахта	–	24 403,8	–	24 403,8
	Заполярная угольная шахта	–	29 799,1	–	29 799,1
	Воркутинская угольная шахта	–	31 210,4	–	31 210,4
	Юньягинская угольная шахта	–	1099,78	–	1099,78
	Воркутинская электростанция	659 000	–	–	659 000
	Итого	660 190,59	147 816,59	0,03	808 007,21
Городской округ Ухта	Аэропорт (внутренний)	15 491,7	0,11	0,43	15 492,24
	Аэропорт (зарубежный)	51,04	–	–	51,04
	Ухтинский НПЗ	443 825	60,68	6,19	443 891,87
	Полигон ТБО	–	6192,58	–	6192,58
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	24,84	15,86	40,7
	Итого	459 367,74	6278,21	22,48	465 668,43
Городской округ Инта	Аэропорт	27,05	–	–	27,05
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	5,38	3,47	8,85
	Итого	27,05	5,38	3,47	35,9
Городской округ Усинск	Аэропорт	8538,92	0,06	0,24	8539,22
	Месторождение нефти и–газа	1 010 970	19 093,7	–	1 030 063,7
	Электростанция	286 000	–	–	286 000
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	4,99	–	4,99
	Итого	1 305 508,92	19 098,75	0,24	1 324 607,91
Городской округ Вуктыл	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	1,32	0,85	2,17
	Итого	0	1,32	0,85	2,17
МР Сосногорск	Электростанция	825 000	–	–	825 000
	Итого	825 000	0	0	825 000
Княжпогостский район	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	2,25	–	2,25
	Итого	0	2,25	0	2,25
МР Печора	Аэропорт	596,43	–	0,02	596,45
	Электростанция	2 429 000	–	–	2 429 000
	Места захоронения	–	3767,91	–	3767,91
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	5,39	3,48	8,87
	Итого	2 429 596,43	3773,3	3,5	2 433 373,23
Усть-Цилемский район	Аэропорт	581,74	–	0,02	581,76
	Итого	581,74	0	0,02	581,76
Ижемский район	–	–	–	–	–
	Итого	0	0	0	0
Удорский МР	Средне-Тиманский	276 633	–	–	276 633
	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	1,24	0,81	2,05
	Итого	276 633	1,24	0,81	276 635,05
Сысольский район	–	–	–	–	–
	Итого	0	0	0	0
Троицко-Печорский район	Бытовые и–производственные отходы (сточные воды)	–	1,19	0,77	1,96
	Итого	0	1,19	0,77	1,96

Окончание табл.

Наименование АДТ	Источник загрязнения	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO ₂ e
		Т			
Корткеросский район	–	1533,45	2,73	0,07	1536,25
	Итого	1533,45	2,73	0,07	1536,25
Усть-Вымский район	Полигон ТБО	–	14 233,3	–	14 233,3
	Итого	0	14 233,3	0	14 233,3
Усть-Куломский район	–	–	–	–	–
	Итого	0	0	0	0
Прилузский район	–	–	–	–	–
	Итого	0	0	0	0
Койгородский район	Полигон ТБО	–	7122,65	–	7122,65
	Итого	0	7122,65	0	7122,65
Итого суммарное по региону		8 253 060,01	201 529,01	74,83	8 454 663,85

таблицы атрибутов по суммарным показателям выбросов парниковых газов по каждому из районов Республики Коми были внесены в программу QGIS. Методом кластеризации созданы пять уровней показателей легенды количества антропогенных выбросов для окрашивания районов Республики Коми от светлого к темному, где светлый — это минимальное количество загрязняющих веществ, а темный — выбросы более 1 млн т. Проанализировав количество выбросов

от каждого из источников антропогенного воздействия, была составлена экологическая схема опасности для 20 районов Республики Коми. Данная модель позволяет наглядно увидеть наибольшее количество выбросов в Печорском и Усинском районах, которые находятся на территории Крайнего Севера Республики Коми (рис. 19).
Для повышения жизнестойкости городов Республики Коми в условиях глобального потепления не-

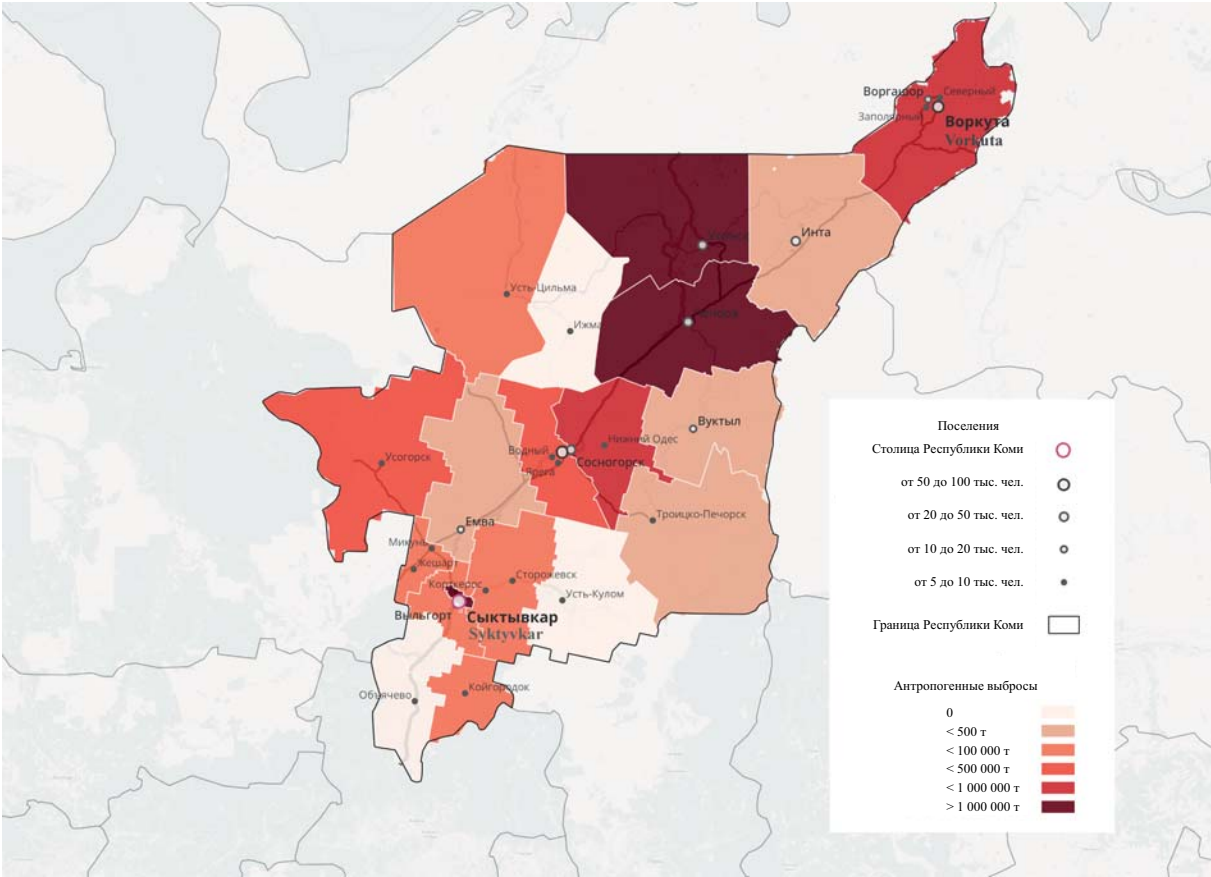


Рис. 19. Районы, наиболее подверженные изменению климата районирования региона Республики Коми, подготовлен в программе QGIS на материалах Climate Trace

обходимо разработать и внедрить планы адаптации к изменению климата. Эти планы должны включать обновление инфраструктуры и жилищного фонда, улучшение систем предупреждения и готовности к чрезвычайным ситуациям, а также содействие устойчивому развитию и использованию возобновляемых энергетических ресурсов. Рост уровня морей и изменение климатических условий могут привести к повреждению и разрушению инфраструктуры и жилищного сектора городов.

Можно выделить несколько видов негативных воздействий на окружающую среду в ходе обустройства месторождений:

- на атмосферу, выбросы при сжигании продукта;
- на водно-биологические ресурсы, сброс сточных вод, уничтожение фауны при строительстве водных переходов.

Парижское соглашение 2015 г. признает, что изменение климата является реальным и беспрецедентным вызовом, требующим срочных действий во всем мире, и определяет такие усилия по снижению, как вклад в «удержание роста среднемировой температуры намного ниже 2 °С сверх доиндустриальных уровней и приложения усилий в целях ограничения роста температуры до 1,5 °С, признавая, что это значительно сократит риски и последствия изменения климата».

В 2022 г. одним из приоритетных направлений нефтегазовых компаний по устойчивому развитию стала экологическая повестка. Нефтегазовые предприятия разрабатывают и внедряют решения для оптимизации промышленной деятельности предприятий, чтобы достичь целей по сокращению выбросов. Среди способов перехода нефтегазовых компаний

в область «зеленых» инноваций можно отметить следующие направления:

1. Внедрение возобновляемых источников энергии — солнечная и ветровая электроэнергетика.
2. Создание и распространение биотоплива.
3. Контроль и снижение удельных углеродных выбросов в разведке и добыче: внедрение инновационных технологий (БПЛА, сканирование, ультразвуковые детекторы).
4. Снижение углеродного следа: улавливание, использование и хранение углерода CCUS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение климата — одна из самых актуальных и серьезных проблем, которые непосредственно влияют на нашу планету и все ее экосистемы. Это глобальное явление затрагивает все регионы мира, включая Россию и Арктическую зону, в которую входит и Республика Коми.

Поэтапное исследование дало возможность проанализировать влияние антропогенных факторов на изменение климата Арктической зоны Российской Федерации и смоделировать схему анализа районирования, позволяющую наглядно показать территории выбросов основных крупных источников загрязнения.

Применение экологических технологий и инженерных решений в нефтегазовой промышленности имеет ряд практических применений, направленных на уменьшение негативного воздействия на окружающую среду. Некоторые из таких решений включают в себя применение современных методов очистки, внедрение новых технологий и средств для снижения выбросов парниковых газов в атмосферу при процессах добычи и переработки нефти и газа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кононова Н.К. Изменение характера циркуляции атмосферы в последние десятилетия как фактор изменения климатических и ледовых условий Арктики // Материалы гляциологических исследований. 2006. № 100. С. 191–199. EDN PBFYVN.

2. Хлебникова Е.И., Школьник И.М., Рудакова Ю.Л. Вероятностные оценки изменения прикладных показателей термического режима для целей адаптации к изменениям климата на территории России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 2. С. 140–158. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-2-140-158. EDN CYOUGW.

3. Болотова Н.Л. Особенности регионального сценария изменения климата Северной территории на примере Вологодской области // Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии : мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию

кафедры общего землеведения и гидрометеорологии Белорусского государственного университета. 2023. С. 422–429. EDN GZYQOV.

4. Манаева И.В. Анализ взаимосвязи экономики и климата в городах России // Экономика региона. 2022. Т. 18. № 3. С. 837–851. DOI: 10.17059/ekon.reg.2022-3-15. EDN XZOHKK.

5. Бексултанова А.И. Роль России в решении проблемы изменения климата // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 92–4. С. 64–65. DOI: 10.18411/trnio-12-2022-173. EDN KBWVHW.

6. Сидоренкова А.В. Влияние изменения климата на биоразнообразие // Аллея науки. 2022. Т. 1. № 1 (64). С. 197–202. EDN YFEWYI.

7. Wurihan, Sainbuyan Bayarsaikhan, Bao Yuhai, Tong Siqin, Jin Hugejiletu, Yang Xueliang. Spatiotemporal variations of vegetation change and its response to cli-

mate change in Mongolia during 1982-2015 // *Nature of Inner Asia*. 2022. No. 2–3 (21). Pp. 37–51. DOI: 10.18101/2542-0623-2022-2/3-37-51. EDN GFCYFL.

8. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Иванов Н.Е. Особенности климата Арктики в 2021 году // *Российские полярные исследования*. 2022. № 1 (47). С. 7–10. EDN ZJPQVQ.

9. Overland J., Wang M., Dunlea E., Box J.E., Corell R., Forsius M. et al. The urgency of Arctic change // *Polar Science*. 2019. Vol. 21. Pp. 6–13. DOI: 10.1016/j.polar.2018.11.008. EDN XPVNO.

10. Park T., Hashimoto H., Wang W., Thrasher B., Michaelis A.R., Lee T. et al. What does global land climate look like at 2 °C warming? // *Earth's Future*. 2023. Vol. 11. Issue 5. DOI: 10.1029/2022ef003330. EDN EXKDXH.

11. Гусев А.П. Потоки метана в тропосфере: геологические и антропогенные источники (по данным Sentinel-5P TROPOMI) // *Региональные геосистемы*. 2023. Т. 47. № 4. С. 580–592. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592. EDN XKYZTS.

12. Alvarez J., Yumashev D., Whiteman G. A framework for assessing the economic impacts of Arctic change // *Ambio*. 2019. Vol. 49. Issue 2. Pp. 407–418. DOI: 10.1007/s13280-019-01211-z. EDN WONNOV.

13. Ritchie H., Rosado P., Roser M. CO₂ and greenhouse gas emissions // *Our World in Data*. 2023.

14. Токтомышев С.Ж., Орозалиев М.Д., Жумабиева А.А., Абдылдаев А.С., Жумабеков А.А. Об озоновом слое и изменении климата атмосферы // *Материаловедение*. 2015. № 1 (15). С. 52–58. EDN RONRWX.

15. Бондаренко Л.В., Маслова О.В., Белкина А.В., Сухарева К.В. Глобальное изменение климата и его последствия // *Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова*. 2018. № 2 (98). С. 84–93. EDN YWMJMQ.

16. Кошкина А.С. Динамика климатических изменений на территории северо-западной Сибири и ее связь с изменениями циркуляции атмосферы // *Земля и Человек*. Актуальные вопросы современного

состояния окружающей среды : сб. ст. Межвузовской науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. празднованию 90-летия Российского государственного гидрометеорологического университета. 2020. С. 47–51. EDN MVVXSA.

17. Сыромятина М.В., Москаленко И.Г., Чистяков К.В. Тенденции изменения климата на Алтае на фоне глобальных климатических изменений (по инструментальным и дендрохронологическим данным) // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Серия 7. Геология. География. 2010. № 3. С. 82–91. EDN MVZETX.

18. Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю., Пердери А., Мельникова М., Залюбовский Е. Глобальная климатическая угроза и экономика России: в поисках особого пути. М. : Московская школа управления СКОЛКОВО, 2020.

19. Снакин В.В. Глобальные изменения климата: прогнозы и реальность // *Жизнь Земли*. 2019. Т. 41. № 2. С. 148–164. EDN VQBPAP.

20. Yumashev D., Hope C., Schaefer K., Riemann-Campe K., Iglesias-Suarez F., Jafarov E. et al. Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1038/s41467-019-09863-x. EDN EQVLIG.

21. Vavrus S.J. The influence of Arctic amplification on mid-latitude weather and climate // *Current Climate Change Reports*. 2018. Vol. 4. Issue 3. Pp. 238–249. DOI: 10.1007/s40641-018-0105-2. EDN YJJQIH.

22. Latysheva I., Vologzhina S., Barkhatova O., Loshchenko K., Sutyryna E. Circulation factors in climate change in the Baikal region // *25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2019. P. 14. DOI: 10.1117/12.2538282

23. Куделькин Н.С. Арктика и глобальное потепление: адаптация к изменению климата и охрана окружающей среды // *Юридические исследования*. 2022. № 1. С. 1–16. DOI: 10.25136/2409-7136.2022.1.37049. EDN KNUXCH.

Поступила в редакцию 27 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 15 апреля 2026 г.

Одобрена для публикации 16 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Анна Евгеньевна Коробейникова — кандидат технических наук, доцент кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 908166, Scopus: 57209303653, ResearcherID: AAC-8979-2022, ORCID: 0000-0002-4357-1757; anna-chega@mail.ru;

Алина Андреевна Сокольников — магистр кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 58565130700, ORCID: 0009-0000-2014-4333; sokolnikova99@mail.ru.

Вклад авторов:

Коробейникова А.В. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы, доработка текста, научное редактирование текста.

Сокольников А.А. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Global warming, primarily linked to anthropogenic greenhouse gas emissions, has been a worldwide trend over recent decades. Climate change is corroborated by the CMIP global climate models, which form the basis for contemporary analysis of climate change. CMIP data, particularly the latest findings from the CMIP6 model, are critical for developing projections and assessing the impacts of climate change. However, despite advances in climate modelling, there is currently a shortage of specialized urban planning methodologies for assessing the impacts of climate change in cities and regions.

One of the most telling indicators of climate change is air temperature. The average annual temperature over land rose by 0.179 °C per decade between 1976 and 2020 [1–3]. To support this argument, the authors have produced graphs showing temperature trends based on data obtained from the Earth Engine Data Catalogue over the last three decades (Fig. 1).

Russia is the only country where the Arctic boundary is enshrined in law, and the Arctic Zone of the Russian Federation (AZRF) has been designated by a decree of the President of the Russian Federation. The AZRF covers nine regions: four fall entirely within it — the Murmansk Oblast, the Nenets Autonomous Okrug (hereinafter “NAO”), the Chukotka NAO and the Yamalo-Nenets NAO; five fall partially within it — the Republic of Komi, the Republic of Karelia, the Republic of Sakha (Yakutia), the Arkhangelsk Oblast and the Krasnoyarsk Krai.

The four sub-Arctic regions comprise: the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, Kamchatka Krai and Magadan Oblast. The Arctic territories cover an area of 4.8 million km² (28 % of the country’s territory). They are home to 2.6 million people, more than half the population of the global Arctic.

Based on information from the Russian statistical yearbooks published by the Federal State Statistics Service, an analysis was carried out of average monthly air temperatures and precipitation levels across the regions of the Russian Federation. In 2020, there was a sharp rise in CH₄, which may indicate the most significant temperature increase recorded across the entire territory of the Arctic Zone of the Russian Federation:

- the average observed temperature in January was –16.5 °C, with a deviation from the norm of 6.4 °C. The greatest deviation from the norm in 2020 was observed in the North-West Federal District (NWFD), at 6.8 °C (Fig. 2, a);
- the average observed temperature in July was 14.7 °C, with a deviation from the norm of 1.3 °C (Fig. 2, b). The greatest deviation from the norm was also observed in the NWFO, amounting to 2.1 °C;
- the average monthly precipitation in July 2003 was 69.5 mm, and in 2020 it was 62.3 mm (Fig. 2, c);
- comparing the graphs of average monthly precipitation by region in the North-West Federal District, it can be concluded that precipitation is directly proportional to air temperature: the warmer the air temperature, the greater

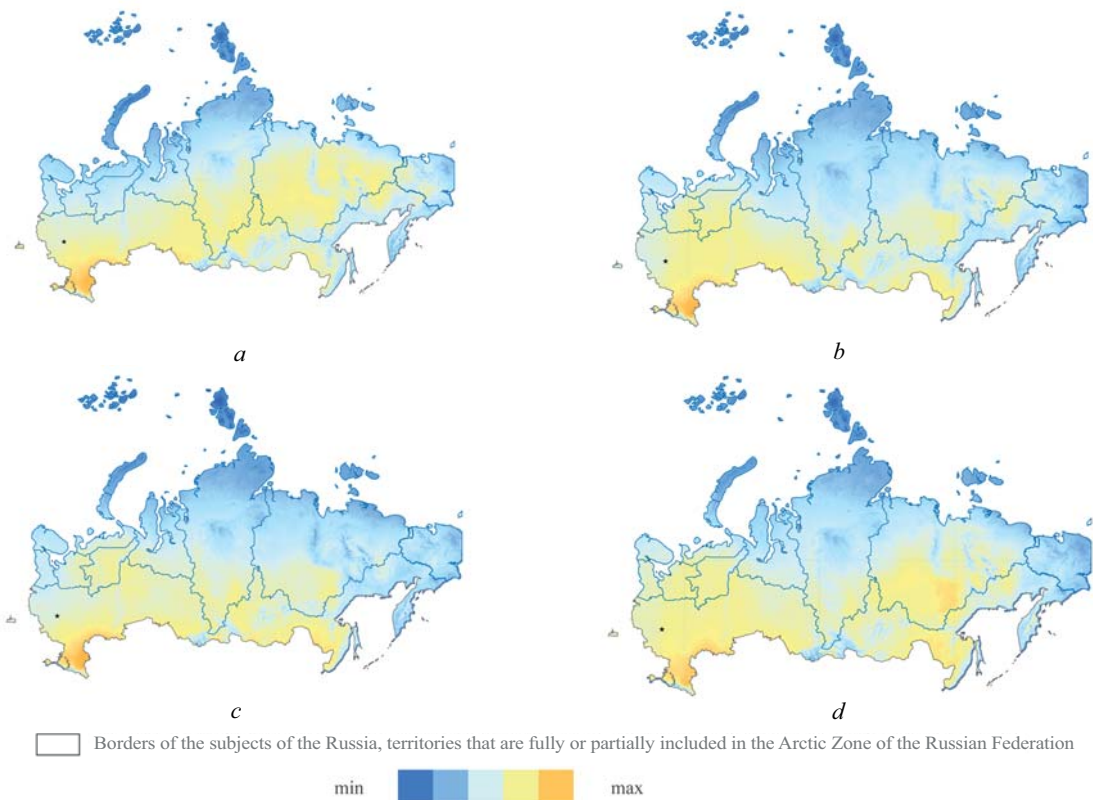


Fig. 1. Meteorological data for the Russian Federation: a — 1991; b — 2000; c — 2015; d — 2022 (based on information from the Earth Engine Data Catalogue)

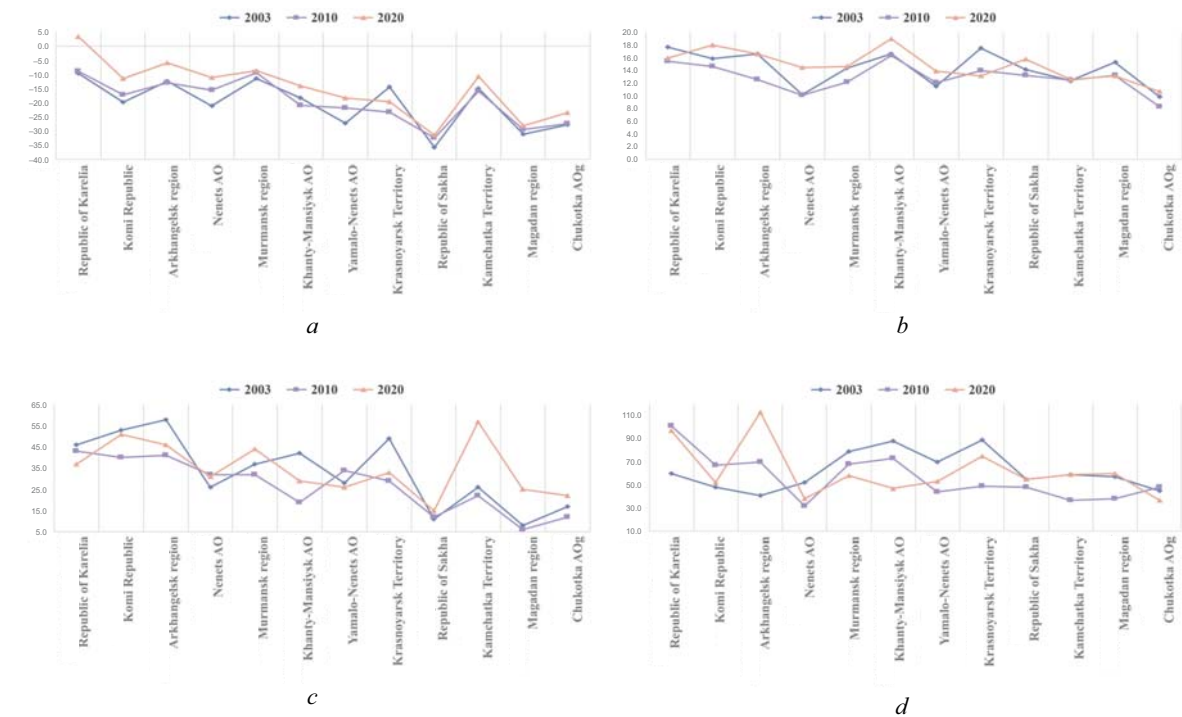


Fig. 2. Average monthly values for the regions of the AZRF: *a* — average monthly air temperature (January); *b* — average monthly air temperature (July); *c* — average monthly precipitation (January); *d* — average monthly precipitation (July) (Russian statistical yearbooks published by the Federal State Statistics Service and Microsoft Excel)

the amount of precipitation falling to the Earth’s surface (Fig. 2).

An analysis of changes in temperature and precipitation between 2003 and 2022 suggests that the accelerated retreat of glaciers during this period is due to a 1.5 °C rise in summer air temperatures since the start of the 21st century, and primarily affects the North-West Federal District. The consequences of global warming are being felt not only in the Arctic region, but also far beyond its borders [4–6].

Greenhouse gas concentrations began to rise rapidly following the resumption of industrial production in the country in 1926 and continued to do so until 1990 (Fig. 3). One of the most significant greenhouse gases is carbon dioxide; gases such as methane and nitrous oxide also contribute to global warming [7–9]. Fig. 3 shows

the total emissions of these three greenhouse gases. The graphs, based on data from OurWorldinData.org, highlight the period 1930–1990, during which a sustained rise in greenhouse gas levels was observed (Fig. 3, 4).

According to data from Roshydromet, the rise in greenhouse gas concentrations across Russia in 2022 reached record levels, primarily for carbon dioxide CO₂ and methane CH₄. Carbon dioxide concentrations across the Russian Federation in 2022 are rising compared with 2020 and 2021 (Fig. 3).

The second most significant cause of global warming after carbon dioxide is methane CH₄ — a colourless, odourless gas. Since 1750, humans have increased the amount of methane in the atmosphere by approximately 150 %. The extraction of fossil fuels, such as oil, gas and coal, is the largest source of methane emissions.

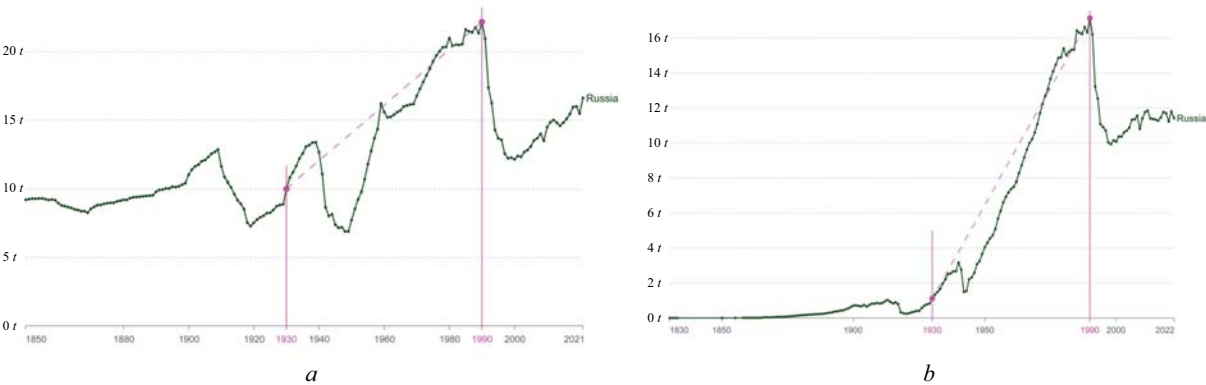


Fig. 3. CO₂e greenhouse gas emissions by category (*a*); per capita CO₂ emissions (*b*) (sources: OurWorldinData.org and Adobe Illustrator)

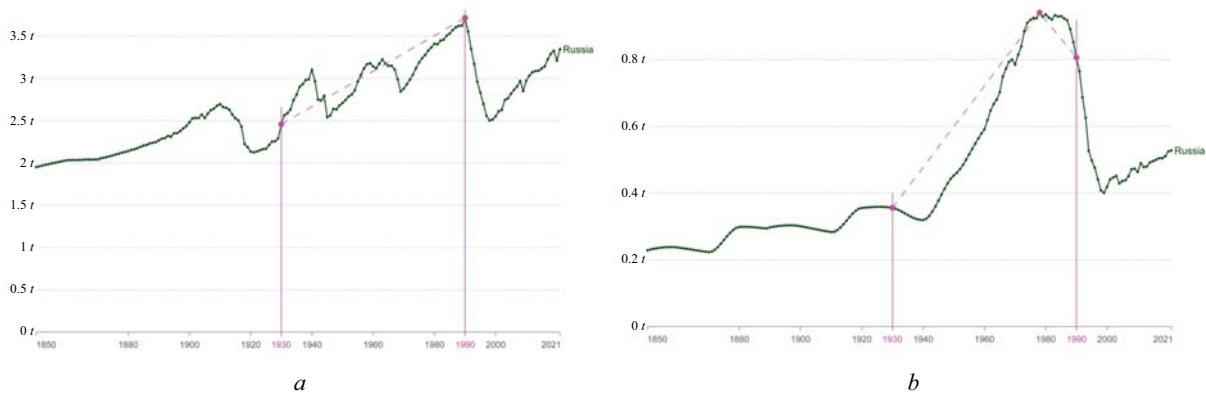


Fig. 4. Per capita greenhouse gas emissions: *a* — CH_4 ; *b* — NO_x (sources: OurWorldinData.org and Adobe Illustrator [13])

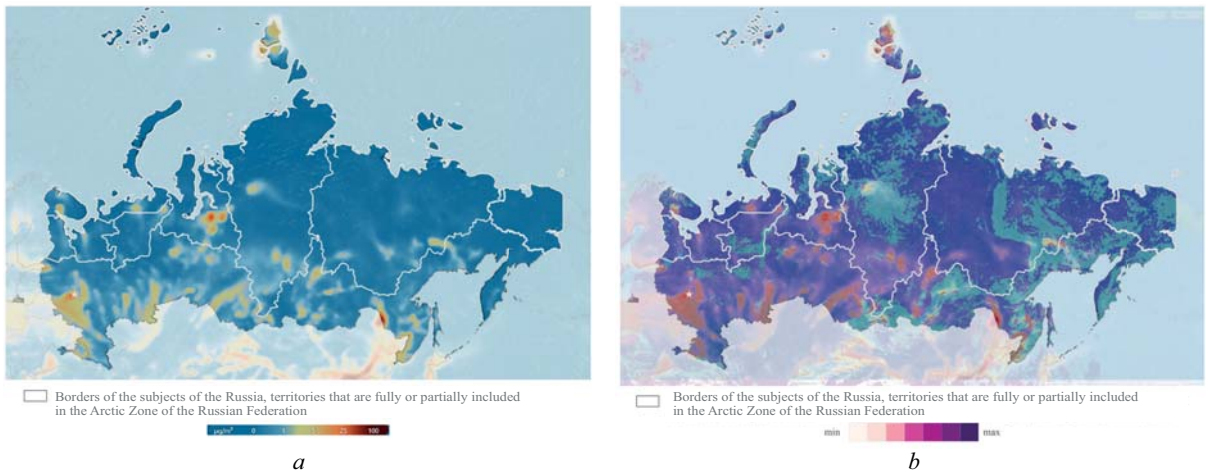


Fig. 5. Concentrations of natural gases within the Russian Federation: *a* — NO_x ; *b* — $\text{NO}_x + \text{CH}_4$ (sources: Earth Engine Data Catalogue and Adobe Illustrator)

Humans have also increased methane emissions through intensive farming practices, livestock rearing and waste disposal [10, 11].

Greenhouse gases such as methane remain in the Earth's atmosphere, allowing sunlight to pass through but trapping heat [12, 13]. One recent study showed that a rapid reduction in methane emissions could slow the rate of global warming by 30 %. In 2020, the average annual per capita concentration of methane was 3.21 tonnes, followed by a surge to 3.35 tonnes in 2021 (Fig. 4, *a*).

Growing demand from agriculture, transport, industry and the energy sector has led to a sharp rise in nitrogen pollution levels and associated greenhouse gas emissions [14]. Nitrogen oxide NO_x emissions from industry and combustion, for example, are 300 times more potent than CO_2 as a greenhouse gas (Fig. 4, *b*).

Methane and other hydrocarbons in natural gas combine with nitrogen oxides to form atmospheric ozone pollution (Fig. 5) [15, 16]. Across much of the country, the duration of snow cover continues to decrease, whilst the maximum winter snow depth is increasing across most of the country. As the permafrost, which covers 63 % of Russia's territory, thaws, greenhouse gases accumulated in the frozen organic matter are released, in particular carbon dioxide CO_2 and methane CH_4 , which has

a more potent impact on the climate [17–19]. The permafrost zone is being actively developed due to its mineral reserves, but the impact of temperature changes is having serious consequences for the infrastructure of the northern regions, which will adversely affect buildings and subsequently lead to their collapse [20, 21].

The rise in greenhouse gas concentrations and the current global warming across the entire globe are directly linked to the problem of human impact [22, 23]. Human economic activity — the use of natural resources, a significant reduction in forest cover, a failure to replenish it, and, as a result, the waterlogging of land, and the expansion of industrial and urban areas — all contribute to an increase in greenhouse gas concentrations and thereby intensify the greenhouse effect, leading to a rise in the average annual temperature of the lower atmosphere.

MATERIALS AND METHODS

Anthropogenic factors are a set of factors directly or indirectly linked to human activity that influence changes in and the functioning of the environment. The main driver of current global warming is the continuing rise in concentrations of CO_2 , CH_4 and nitrogen oxides NO_x (Fig. 6).

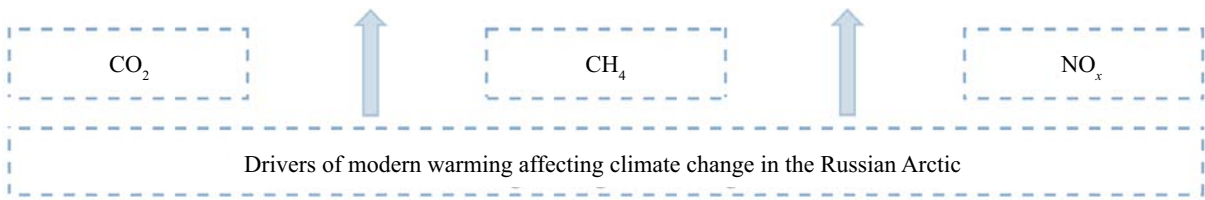


Fig. 6. The main drivers of current global warming

The classification of key anthropogenic sources of greenhouse gas emissions can be based on various criteria, such as the type of activity, scale, or whether they are direct or indirect sources:

- 1) direct sources:
 - power stations (particularly those using fossil fuels);
 - coal mines (methane emissions during extraction);
 - landfill sites (methane from the decomposition of organic waste);
 - manufacturing (depending on the sector; many manufacturing processes emit CO₂ and other gases);
- 2) indirect sources:
 - road transport (emissions from fuel combustion);
 - airports (including emissions from both aircraft and associated infrastructure);
 - heat island effect (not a source in the strict sense, but contributes to higher temperatures and, consequently, increased energy consumption);
- 3) household and industrial waste:
 - may be a source of both direct and indirect emissions, depending on how the waste is managed and processed.

The impact of anthropogenic factors on environmental climate change:

- rising temperatures;
- changes in precipitation;
- rising water levels;
- changes to ecosystems.

Based on the classification of the main anthropogenic factors, a theoretical model of the impact of anthropogenic pressure on climate change has been developed (Fig. 7).

To analyze the study area in terms of greenhouse gas emissions, the region must be broken down into its constituent parts; in our case, by municipal districts. The tools used to model the areas most vulnerable to climate change are:

- spatial GIS modelling, which enables the analysis of spatial data, including the distribution of gas emissions across the territory;
- analytical methods are used to identify patterns and trends in climate and emissions data;
- statistical analysis of data makes it possible to assess the extent to which various factors influence greenhouse gas emissions;
- mapping.

The study comprises four key stages, as shown in Fig. 8.

The first stage involves gathering information on climate change in the region over recent decades: meteorological data, precipitation levels, and the climate at specific locations affected by the urban heat island (UHI) effect.

In the second stage, cartographic analysis is used to identify the locations of the most hazardous waste, which also affects biodiversity. The locations of the main sources of anthropogenic impact are also determined, and Climate Trace data is extracted to establish the locations of major sources and assess quantitative emissions over time.

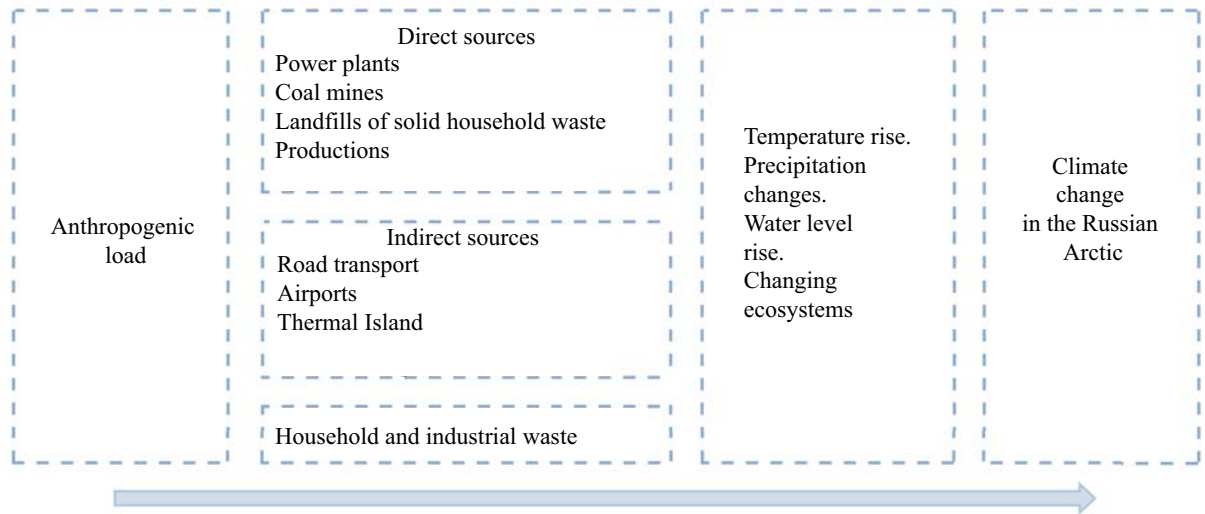


Fig. 7. A theoretical model of the impact of human activity on climate change

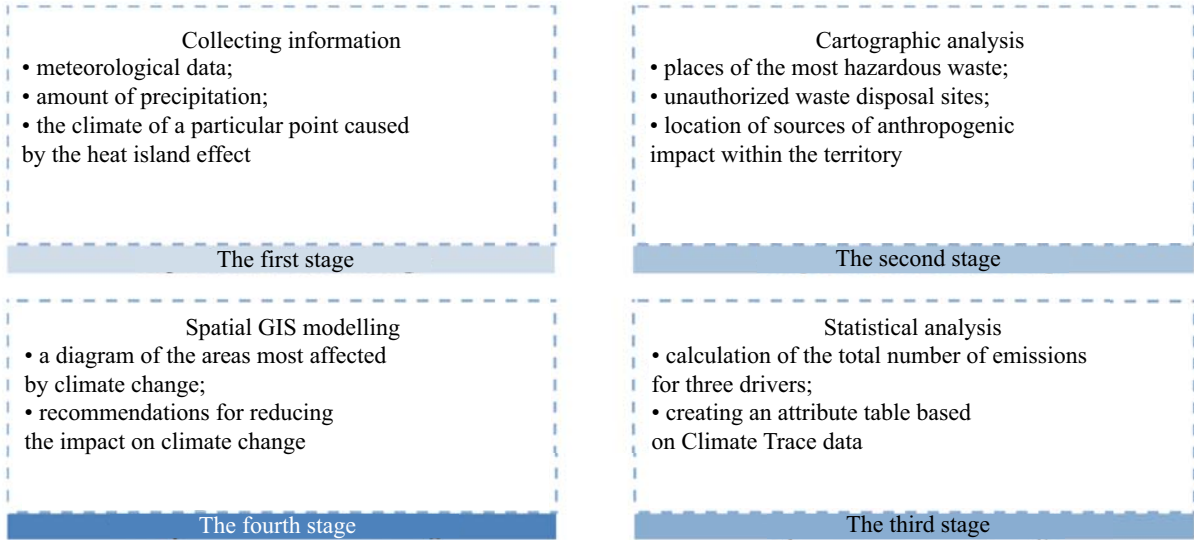


Fig. 8. Stages of the study to identify the impact of anthropogenic factors on the area

In the third stage, for each individual municipal district, the total emissions of the three greenhouse gases — CO_2 , CH_4 , NO_x — must be calculated, taking into account the types of major pollution sources. This analysis is carried out using QGIS software, based on the open-access Climate Trace database of major emission sources. Data from Climate Trace is exported into an attribute table for each municipal district, containing the following data fields: the name of the administrative-territorial division (ATD), the main pollution source factor, and the total emissions.

The fourth stage involves spatial GIS modelling. Based on the attribute data, a map of the areas most vulnerable to climate change is compiled using a data clustering method, with a colour gradient ranging from light to dark, corresponding to greenhouse gas emissions ranging from negligible to the highest levels. At this stage, proposals for regional adaptation are also drawn up based on the resulting model, aimed at organizing measures to reduce greenhouse gas emissions within the study area.

The research stages outlined will enable an analysis of the impact of anthropogenic factors on climate change in the Arctic region of the Russian Federation and the formulation of recommendations to mitigate its negative consequences. The zoning analysis framework developed will make it possible to clearly identify the areas where emissions from the main major sources occur.

RESEARCH RESULTS

The territory of the Komi Republic was selected for the validation of theoretical research. The area under consideration is situated in the north-east of the European part of Russia and forms part of the North-West Federal District (Fig. 9). According to Resolution No. 1946 of the Government of the Russian Federation dated 16 November 2021, the urban districts of Vorkuta, Inta and Usinsk, as well as the municipal districts of Ust-Tsilemsky, Izhemsky and Pechora, are classified as Far

North regions of the Komi Republic; the following localities are classified as equivalent to Far North regions: Syktyvkar, Ukhta, Vuktyl; and the municipal districts of Knyazhpogostsky, Koygorodsky, Kortkerossky, Pri-luzsky, Syktyvdinsky, Sosnogorsk, Sysolsky, Troitsko-Pechorsky, Udorsky, Ust-Vymsky and Ust-Kulomsky [2].

The first stage involves gathering information: meteorological data, precipitation levels and the climate of a specific location affected by the heat island effect. The Republic of Komi’s geographical location at relatively high latitudes, its distance from the warm Atlantic Ocean and its proximity to the vast Asian continent result in a temperate continental climate, which differs significantly from that of the rest of Europe. The republic’s considerable extent — 785 km from north to south, 1,275 km from south-west to north-east and 695 km from west to east — as well as the diversity of its physical and geographical conditions, result in significant differences in the climate of its individual regions.

Using the Earth Engine Data Catalog geospatial platform for satellite imagery, specifically the Terra Climate dataset on monthly climate and climatic water balance for global land surfaces, meteorological data maps of the Komi Republic were compiled for the period 1991–2022 (Fig. 10). As in other Arctic regions, the Komi Republic is experiencing a rise in average annual temperature. Over recent decades, a trend towards rising temperatures across the different seasons has become established, which is particularly noticeable during the winter months.

The standardized SPEIbase precipitation database in the Earth Engine data catalogue is compiled on the basis of the scheme covering the period 1991–2022, using the 12-month SPEI time scale. An increase in annual precipitation is observed (Fig. 11). Over the last 30 years, temperatures have risen by 0.8–1.5 °C, causing the boundary of the permafrost layer lying just below the surface to retreat northwards by 30–50 km.



Fig. 9. The Komi Republic within the settlement pattern of the Russian Federation (source: QGIS and Adobe Illustrator)

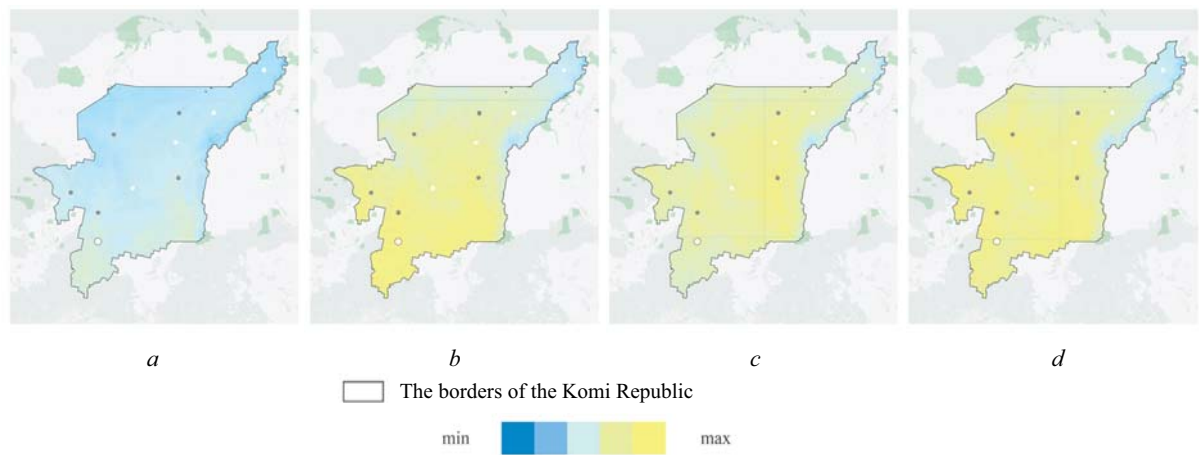


Fig. 10. Meteorological data for the Komi Republic: *a* — 1991; *b* — 2000; *c* — 2015; *d* — 2022 (source: Earth Engine Data Catalogue and Adobe Illustrator)

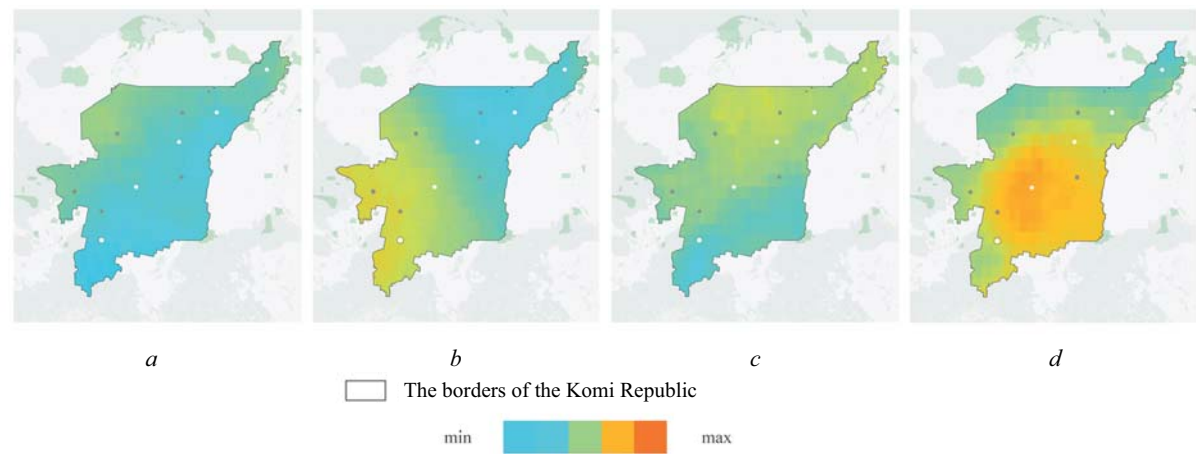


Fig. 11. Precipitation in the Komi Republic: *a* — 1991; *b* — 2000; *c* — 2015; *d* — 2022 (sources: Earth Engine Data Catalogue and Adobe Illustrator)

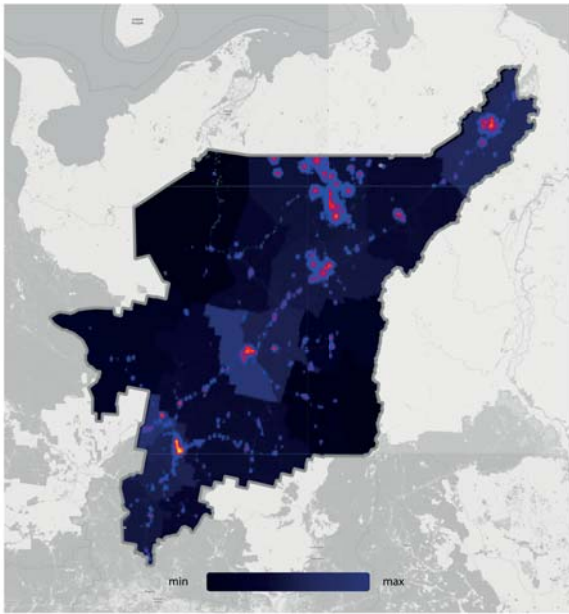


Fig. 12. Population density and distribution in the Komi Republic (sources: Earth Engine Data Catalogue and Adobe Illustrator)

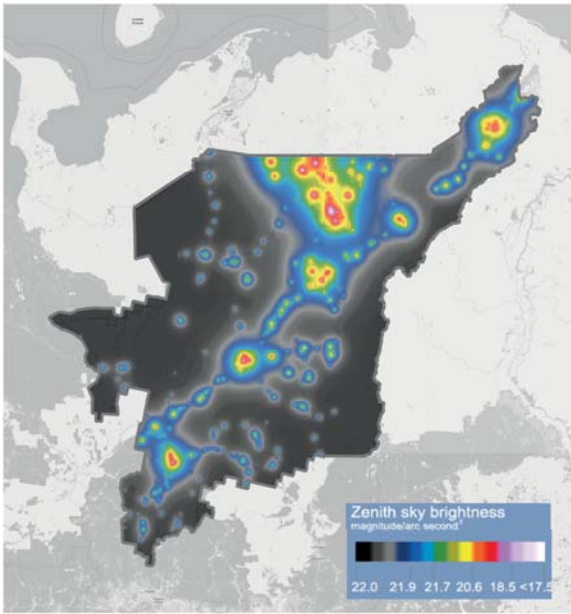


Fig. 13. Atlas of artificial sky glow based on satellite data (sources: Light Pollution Map and Adobe Illustrator)

The climate at a specific location is determined by the characteristics of the urban environment in its vicinity, not only on a local scale (within a radius of the first few hundred metres) but also on a mesoscale (within a radius of up to 10 km). This is because the thermal effects of small, homogeneous areas accumulate and are transported by air currents over the city. As a result, a meso-scale heat island is formed, which is most pronounced in city centres but, due to atmospheric transport, can spread to the outskirts of the metropolis and even into the suburbs. The heat island effect is also present in the Komi Republic, although the scale of its manifestation may be much smaller compared with large cities.

Using the Earth Engine dataset on global human-induced changes CSP gHM, a composite index of human-induced changes to the Earth’s surface has been compiled,

calculated by estimating the proportion of altered locations (pixels). The Komi Republic has a low population density and consists largely of natural landscapes, including forests, plains and various water bodies. As a result, the region does not exhibit a pronounced heat island effect, which typically occurs in urban areas with high building density and the use of paved surfaces (Fig. 12).

A map of artificial sky glow was also compiled using satellite data from the Light Pollution Map (World Atlas 2015). Based on Fig. 13, it can be concluded that sky glow is not caused solely by built-up areas.

Using data from the Light Pollution Map (World Atlas 2015) and the energy base catalogue of oil and gas fields, two maps were overlaid in Illustrator; from this, it can be concluded that sky glow corresponds geographically to the extent of active oil fields, as revealed by their

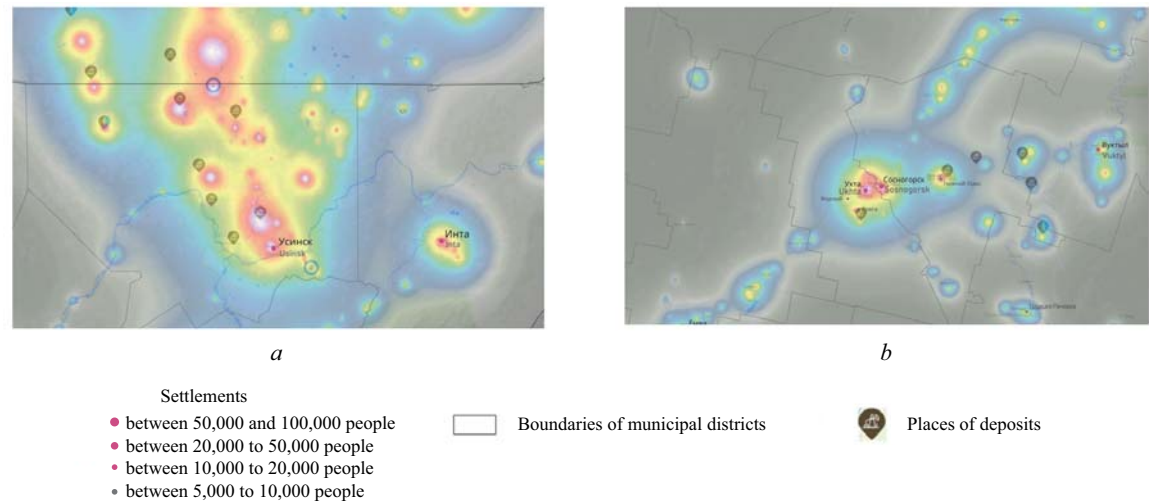


Fig. 14. Sky and field illumination, illustrated by the following examples: *a* — Usinsk District; *b* — Ukhta District (sources: Light Pollution Map, energy base and Adobe Illustrator)

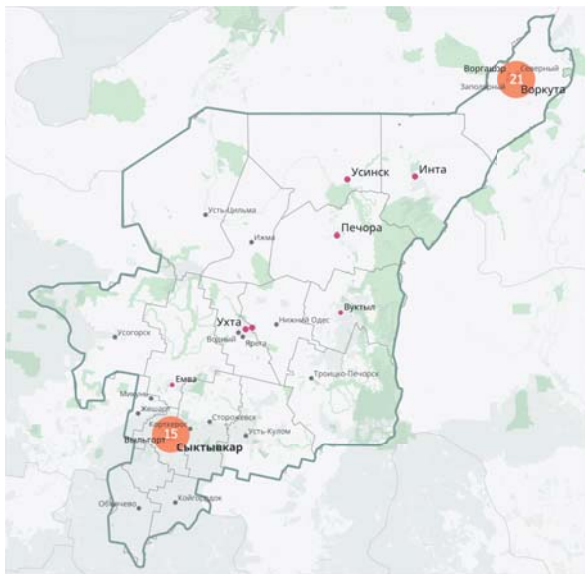


Fig. 15. Sites where hazardous waste is accumulated (sources: QGIS and Adobe Illustrator)

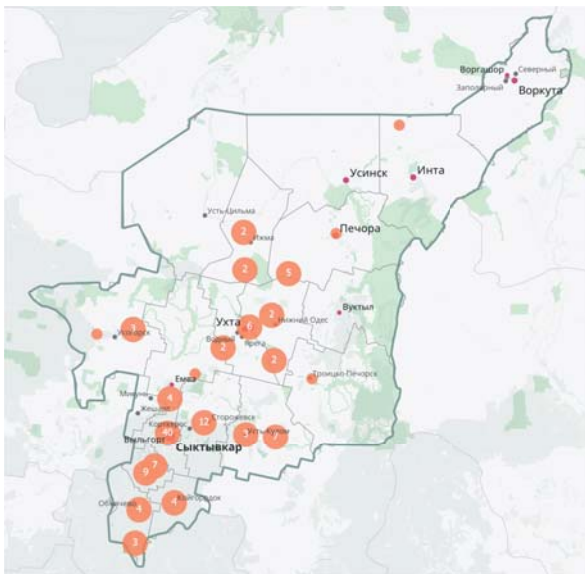


Fig. 16. Unauthorized waste disposal sites located on forest land (sources: QGIS and Adobe Illustrator)

electric lighting, as well as the light and heat emitted during the combustion of natural gas (Fig. 14). Burning natural gas was originally dissolved in crude oil and is released from the solution during production. Drilling companies burn it off in a flare because it is impractical or uneconomical to use the gas on the drilling site, or because transporting it to market is costly. This practice produces a large flare of burning gas, which illuminates the surrounding area and releases high temperatures and pollution into the atmosphere.

In the second stage, using the data from the analysis of the territorial waste management scheme, maps of hazardous waste accumulation sites were drawn up and un-

authorized waste disposal sites located on forest fund land were identified (Fig. 15 and 16). Among the 11 regions of the North-West Federal District, the Komi Republic ranks fifth in terms of the volume of waste generated. The main contributors to the generation of waste harmful to both the environment and human health are mineral extraction and processing enterprises, as the Komi Republic is one of the largest energy and raw material bases in north-western Russia, particularly for coal, timber and oil. The main industrial sectors generating high levels of waste are coal mining (OJSC “Vorkutauhol”, OJSC “Intauhol Mine”), oil production (OJSC “Komnedra”, OJSC “Severnaya Neft”, OJSC “Yenisei”) and timber

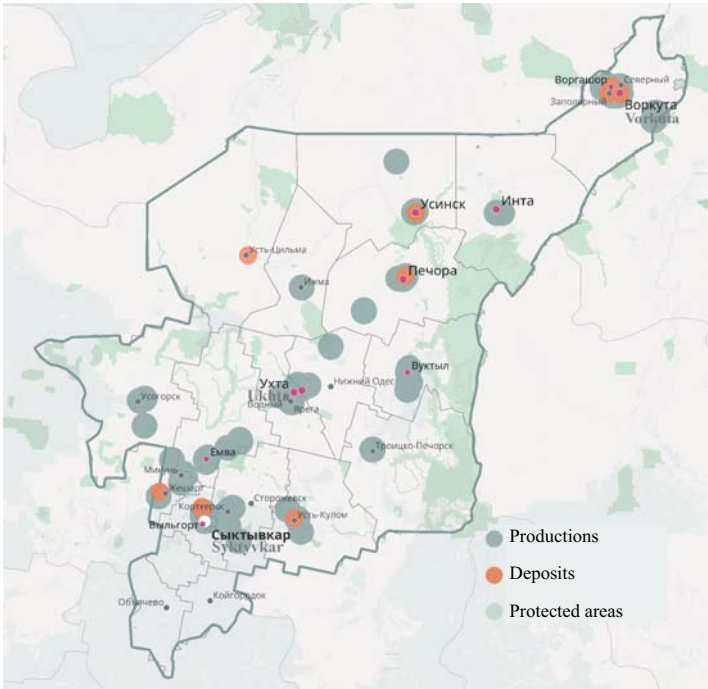


Fig. 17. Analysis of the distribution of sources of anthropogenic impact (sources: QGIS and Adobe Illustrator)

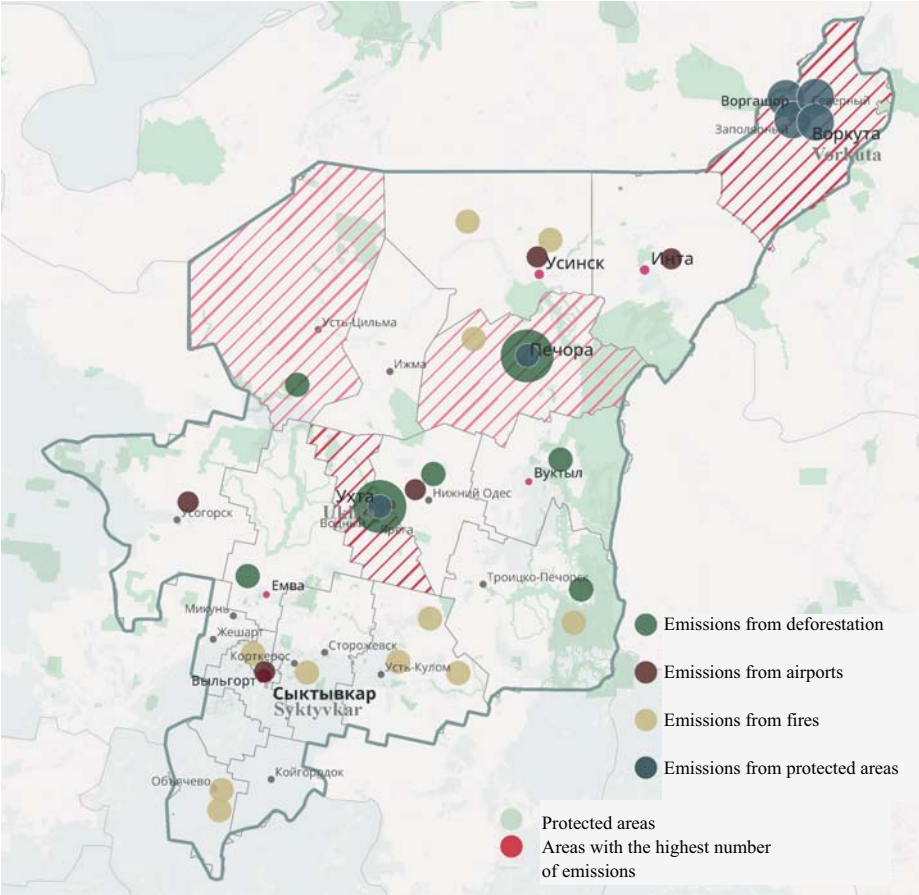


Fig. 18. Emissions from major sources (sources: Climate Trace and Adobe Illustrator)

processing (OJSC “Mondi SLPK”). In percentage terms, these enterprises account for 80 per cent of waste generation, and the areas affected by pollution are not limited to land alone. Waste that cannot be reused or recycled is sent to storage and disposal sites (Fig. 17).

Furthermore, using QGIS data, the locations of the main sources of anthropogenic impact were identified: industrial facilities and mineral deposits (Fig. 17). To calculate greenhouse gas emissions, Climate Trace data — based on satellite imagery, remote sensing methods and a trained artificial intelligence algorithm — were downloaded. A detailed analysis of global emissions made it possible to identify the locations of major sources and to estimate the quantitative emissions over time (Fig. 18). Based on this, it can be

concluded that an interrelated analysis of anthropogenic emission sources is being carried out, linking the indicators from the first stage of the study, waste accumulation sites, the locations of sources of anthropogenic impact, and the emission volumes of the main major sources (source: Climate Trace).

The third stage involves a statistical analysis of greenhouse gas emissions within the Komi Republic, including carbon dioxide CO₂, nitrogen oxides NO_x and methane CH₄, which have a significant impact on the region’s environment and climate.

Based on information from Climate Trace, a Table of attributes has been compiled for the three greenhouse gases, showing the name of the pollution source and its

Volume of pollutant emissions Source: ClimateTrace and Microsoft Excel

Name of the administrative-territorial division	Pollution source	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO ₂ e
		t			
Syktyvkar Urban District	Domestic airport	34,391.6	0.24	0.96	34,392.8
	International airport	1,344.79	0.01	0.04	1,344.84
	Road transport	72,867.7	2.39	1.88	72,871.97
	Power plant	2,175,000	—	—	2,175,000
	Municipal solid waste landfill	—	3,128.02	—	3,128.02
	Domestic and industrial waste (wastewater)	—	61.08	39.43	100.51
	Total	2,283,604.09	3,191.74	42.31	2,286,838.14

Continuation of the Table

Name of the administrative-territorial division	Pollution source	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO ₂ e
		t			
Syktyvdinsky District	Road transport	11,017	0.36	0.28	11,017.64
	Total	11,017	0.36	0.28	11,017.64
Vorkuta Urban District	Airport	1,190.59	0.01	0.03	1,190.63
	Vorgashorskaya Coal Mine	–	61,303.5	–	61,303.5
	Komsomolskaya Coal Mine	–	24,403.8	–	24,403.8
	Zapolyarnaya Coal Mine	–	29,799.1	–	29,799.1
	Vorkutinskaya Coal Mine	–	31,210.4	–	31,210.4
	Yunyanginskaya Coal Mine	–	1,099.78	–	1099.78
	Vorkuta Power Plant	659,000	–	–	659,000
	Total	660,190.59	147,816.59	0.03	808,007.21
Ukhta Urban District	Domestic airport	15,491.7	0.11	0.43	15,492.24
	International airport	51.04	–	–	51.04
	Ukhta Oil Refinery	443,825	60.68	6.19	443,891.87
	Municipal solid waste landfill	–	6,192.58	–	6,192.58
	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	24.84	15.86	40.7
	Total	459,367.74	6,278.21	22.48	465,668.43
Inta Urban District	Airport	27.05	–	–	27.05
	Domestic and industrial waste (wastewater)		5.38	3.47	8.85
	Total	27.05	5.38	3.47	35.9
Usinsk Urban District	Airport	8,538.92	0.06	0.24	8,539.22
	Oil and gas field	1,010,970	19,093.7	–	1,030,063.7
	Power plant	286,000	–	–	286,000
	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	4.99	–	4.99
	Total	1,305,508.92	19,098.75	0.24	1,324,607.91
Vuktyl Urban District	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	1.32	0.85	2.17
	Total	0	1.32	0.85	2.17
Sosnogorsk Municipal District	Power plant	825,000	–	–	825,000
	Total	825,000	0	0	825,000
Knyazhpogostsky District	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	2.25	–	2.25
	Total	0	2.25	0	2.25
Pechora Municipal District	Airport	596.43	–	0.02	596.45
	Power plant	2,429,000	–	–	2,429,000
	Waste disposal sites	–	3,767.91	–	3,767.91
	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	5.39	3.48	8.87
	Total	2,429,596.43	3,773.3	3.5	2,433,373.23
Ust-Tsilemsky District	Airport	581.74	–	0.02	581.76
	Total	581.74	0	0.02	581.76
Izhemsky District	–	–	–	–	–
	Total	0	0	0	0
Udorsky Municipal District	Sredne-Timansky	276,633	–	–	276,633
	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	1.24	0.81	2.05
	Total	276,633	1.24	0.81	276,635.05
Sysolsky District	–	–	–	–	–
	Total	0	0	0	0

End of the Table

Name of the administrative-territorial division	Pollution source	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CO _{2e}
		t			
Troitsko-Pechorsky District	Domestic and industrial waste (wastewater)	–	1.19	0.77	1.96
	Total	0	1.19	0.77	1.96
Kortkerossky District	–	1,533.45	2.73	0.07	1,536.25
	Total	1,533.45	2.73	0.07	1,536.25
Ust-Vymsky District	Municipal solid waste landfill	–	14,233.3	–	14,233.3
	Total	0	14,233.3	0	14,233.3
Ust-Kulomsky District	–	–	–	–	–
	Total	0	0	0	0
Priluzsky District	–	–	–	–	–
	Total	0	0	0	0
Koygorodsky District	Municipal solid waste landfill	–	7,122.65	–	7,122.65
	Total	0	7,122.65	0	7,122.65
Regional total		8,253,060.01	201,529.01	74.83	8,454 663.85

location within the region, as well as the total emissions of each greenhouse gas — both by individual pollution source and by district, and for the Komi Republic as a whole. The Table shows that the highest volume of emissions of these three greenhouse gases is concentrated in the Arctic zone of the Komi Republic.

In the fourth stage, a spatial GIS modelling scheme is drawn up based on three main pollutants: carbon dioxide CO₂, nitrogen oxides NO_x and methane CH₄, taking into account the extent of their impact on human health and the environment. Data from the attribute Table on total greenhouse gas emissions for each district

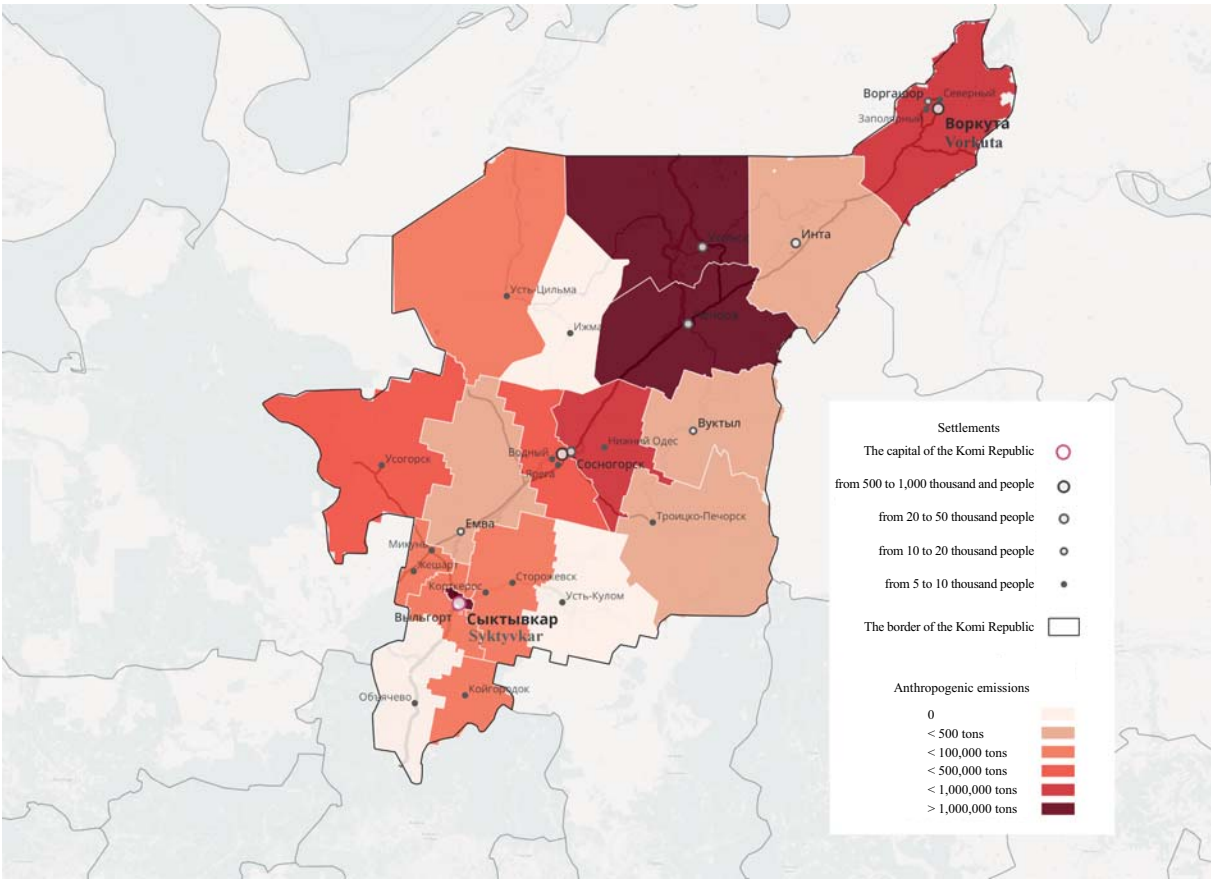


Fig. 19. Areas most vulnerable to climate change in the Komi Republic, prepared using QGIS based on data from Climate Trace

of the Komi Republic were imported into QGIS. Using a clustering method, five levels of the legend for anthropogenic emissions were created to colour-code the districts of the Komi Republic from light to dark, where light indicates the lowest levels of pollutants and dark indicates emissions exceeding 1 million tonnes. Following an analysis of emissions from each source of human activity, an environmental risk map was compiled for the 20 districts of the Komi Republic. This model clearly shows the highest levels of emissions in the Pechora and Usinsk districts, which are located in the Far North of the Komi Republic (Fig. 19).

To enhance the resilience of towns and cities in the Komi Republic in the face of global warming, it is necessary to develop and implement climate change adaptation plans. These plans should include the modernization of infrastructure and the housing stock, the improvement of emergency warning and preparedness systems, and the promotion of sustainable development and the use of renewable energy sources. Rising sea levels and changing climatic conditions may lead to damage to and destruction of urban infrastructure and the housing sector.

Several types of negative environmental impacts can be identified during the development of deposits:

- on the atmosphere, emissions from the combustion of the product;
- on aquatic and biological resources: discharge of wastewater, destruction of fauna during the construction of water crossings.

The 2015 Paris Agreement recognizes that climate change is a real and unprecedented challenge requiring urgent global action, and identifies such mitigation efforts as a contribution to “holding the increase in the global average temperature well below 2 °C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5 °C, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change”.

In 2022, the environmental agenda became one of the key priorities for oil and gas companies in terms of sustainable development. Oil and gas firms are developing and implementing solutions to optimize their industrial operations in order to meet their emissions reduction targets. Among the ways in which oil and gas companies are transitioning towards “green” innovations, the following areas are worth noting:

1. The adoption of renewable energy sources — solar and wind power.
2. The production and distribution of biofuels.
3. Monitoring and reducing carbon emissions per unit in exploration and production: the introduction of innovative technologies (UAV, scanning, ultrasonic detectors).
4. Reducing the carbon footprint: carbon capture, utilization and storage (CCUS).

CONCLUSION AND DISCUSSION

Climate change is one of the most pressing and serious issues directly affecting our planet and all its ecosystems. This global phenomenon affects all regions of the world, including Russia and the Arctic region, of which the Komi Republic forms part.

This phased study has made it possible to analyze the impact of anthropogenic factors on climate change in the Arctic region of the Russian Federation and to model a zoning analysis scheme that clearly illustrates the areas of emissions from the main major sources of pollution.

The application of environmental technologies and engineering solutions in the oil and gas industry has a number of practical applications aimed at reducing the negative impact on the environment. Some of these solutions include the use of modern purification methods and the introduction of new technologies and measures to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere during oil and gas extraction and processing.

REFERENCES

1. Kononova N.K. Changes in atmospheric circulation patterns in recent decades as a factor in changing climatic and ice conditions in the Arctic. *Materials of Glaciological Research*. 2006; 100:191-199. EDN PBFYVN. (rus.).
2. Khlebnikova E.I., Shkolnik I.M., Rudakova Yu.L. Probabilistic estimates of change in applied indicators of the thermal regime for climate change adaptation over the territory of Russia. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021; 7(2):140-158. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-2-140-158. EDN CYOUGW. (rus.).
3. Bolotova N.L. Features of the regional scenario of climate change in the northern territory by the example of the Vologda region. *Fundamental and Applied Research in Hydrometeorology : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of General Earth Science and Hydrometeorology of Belarusian State University*. 2023; 422-429. EDN GZYQOV. (rus.).
4. Manaeva I.V. Analysis of the climate — economy relationship in Russian cities. *Economy of Regions*. 2022; 18(3):837-851. DOI: 10.17059/ekon.reg.2022-3-15. EDN XZOHKK. (rus.).
5. Beksultanova A.I. The role of Russia in addressing the problem of climate change. *Trends in the Development of Science and Education*. 2022; 92-4:64-65. DOI: 10.18411/trnio-12-2022-173. EDN KBWVHW. (rus.).
6. Sidorenkova A.V. The impact of climate change on biodiversity. *Science Alley*. 2022; 1(1):(64):197-202. EDN YFEWYI. (rus.).
7. Wurihan, Sainbuyan Bayarsaikhan, Bao Yuhai, Tong Siqin, Jin Hujieletu, Yang Xueliang. Spatiotem-

poral variations of vegetation change and its response to climate change in Mongolia during 1982–2015. *Nature of Inner Asia*. 2022; 2-3(21):37–51. DOI: 10.18101/2542-0623-2022-2/3-37-51. EDN GFCYFL.

8. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Ivanov N.E. Features of the Arctic climate in 2021. *Russian Polar Research*. 2022; 1(47):7–10. EDN ZJPQVQ. (rus.).

9. Overland J., Wang M., Dunlea E., Box J.E., Corell R., Forsius M. et al. The urgency of Arctic change. *Polar Science*. 2019; 21:6–13. DOI: 10.1016/j.polar.2018.11.008. EDN XPVNOG.

10. Park T., Hashimoto H., Wang W., Thrasher B., Michaelis A.R., Lee T. et al. What does global land climate look like at 2 °C warming? *Earth's Future*. 2023; 11(5). DOI: 10.1029/2022ef003330. EDN EXKDXH.

11. Gusev A.P. Methane flows in the troposphere: geological and anthropogenic sources (according to sentinel-5P TROPOMI data). *Regional Geosystems*. 2023; 47(4):580–592. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592. EDN XKYZTS. (rus.).

12. Alvarez J., Yumashev D., Whiteman G. A framework for assessing the economic impacts of Arctic change. *Ambio*. 2019; 49(2):407–418. DOI: 10.1007/s13280-019-01211-z. EDN WONNOV.

13. Ritchie H., Rosado P., Roser M. CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. 2023.

14. Toktomyshev S.Zh., Orozaliev M.D., Zhumaliyeva A.A., Abdylbaev A.S., Zhumabekov A.A. On the ozone layer and atmospheric climate change. *Materials Science*. 2015; 1(15):52–58. EDN RONRWX. (rus.).

15. Bondarenko L.V., Maslova O.V., Belkina A.V., Sukhareva K.V. Global climate change and its consequences. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2018; 2(98):84–93. EDN YWMJMQ. (rus.).

16. Koshkina A.S. Dynamics of climate changes in northwestern Siberia and their relationship with changes in atmospheric circulation. *Earth and Human. Current Issues of the Modern State of the Environment : Collection*

of Articles of the Interuniversity Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists dedicated to the 90th anniversary of the Russian State Hydrometeorological University. 2020; 47–51. EDN MVVXSA. (rus.).

17. Syromyatina M.V., Moskalenko I.G., Chistyakov K.V. Tendencies of climate change in the Altai mountains against the background of global climatic changes derived from instrumental and dendrochronological data. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2010; 3:82–91. EDN MVZETX. (rus.).

18. Mitrova T., Khokhlov A., Melnikov Yu., Perdero A., Melnikova M., Zalyubovsky E. *Global climate threat and the Russian economy: in search of a special path*. Moscow, SKOLKOVO Moscow School of Management, 2020. (rus.).

19. Snakin V.V. Global climate change: forecasts and reality. *Life of the Earth*. 2019; 41(2):148–164. EDN VQPBAP. (rus.).

20. Yumashev D., Hope C., Schaefer K., Riemann-Campe K., Iglesias-Suarez F., Jafarov E. et al. Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements. *Nature Communications*. 2019; 10(1). DOI: 10.1038/s41467-019-09863-x. EDN EQVLIG.

21. Vavrus S.J. The influence of Arctic amplification on mid-latitude weather and climate. *Current Climate Change Reports*. 2018; 4(3):238–249. DOI: 10.1007/s40641-018-0105-2. EDN YJJQIH.

22. Latysheva I., Vologzhina S., Barkhatova O., Loshchenko K., Sutyryna E. Circulation factors in climate change in the Baikal region. *25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2019; 14. DOI: 10.1117/12.2538282

23. Kudelkin N. The arctic and global warming: adaptation to climate change and environmental protection. *Legal Studies*. 2022; 1:1–16. DOI: 10.25136/2409-7136.2022.1.37049. EDN KNUXCH. (rus.).

Received March 27, 2026.

Adopted in revised form on April 15, 2026.

Approved for publication on April 16, 2026.

B I O N O T E S : **Anna E. Korobeinikova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 908166, Scopus: 57209303653, ResearcherID: AAC-8979-2022, ORCID: 0000-0002-4357-1757; anna-chega@mail.ru;

Alina A. Sokolnikova — Master of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 58565130700, ORCID: 0009-0000-2014-4333; sokolnikova99@mail.ru.

Contribution of the authors:

Anna E. Korobeinikova — scientific guidance, research concept, development of methodology, final conclusions, revision of the text, scientific editing of the text.

Alina A. Sokolnikova — collecting material, processing material, writing source text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.