



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра геоэкологии, природопользования и экологической безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На тему Экологические проблемы загрязнения почв в Арктической зоне
Российской Федерации

Исполнитель Муратова Диана Хусаеновна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат биологических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Рижия Елена Яновна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Дроздов Владимир Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

«01» 12 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

Введение.....	4
ГЛАВА 1 Физико-географическая характеристика арктической зоны РФ и Красноярского края.....	6
1.1 Физико-географическое описание Арктической зоны РФ	6
1.2 Физико-географическое описание Красноярского края	7
1.3 Роль почвенного покрова в экосистеме Арктического региона	10
1.4 Уязвимость почвенного покрова в Арктическом регионе.....	12
ГЛАВА 2 Функционирование почв в условиях глобальных изменений: факторы, современное состояние	17
2.1 Факторы, влияющие на почвы криолитозоны.....	17
2.1.1 Климатические изменения и их влияние на состояние почв.....	17
2.1.2 Геология Арктики	19
2.1.3 Биологические процессы и их роль в трансформации почв.....	21
2.2 Современное состояние почв криолитозоны	23
2.2.1 Типы почв криолитозоны и их распространение	23
2.2.2 Изменения, происходящие в почвах криолитозоны в результате глобальных изменений	25
ГЛАВА 3 Экологические проблемы загрязнения почв в арктической зоне РФ	27
3.1 Исторический обзор проблемы загрязнения почв.....	27
3.2 Почвы Красноярского края	30
3.3 Загрязнение почв нефтепродуктами	32
3.4 Загрязнение почв Арктических регионов тяжелыми металлами.....	34
3.5 Обзор современных методов анализа почвенных проб.....	36
3.5.1 Особенности почвенных проб в Арктической зоне	36
3.5.2 Физико-химические методы анализа.....	38
3.5.3 Биологические методы анализа.....	40
3.5.4 Молекулярные методы анализа.....	41
3.5.5 Геохимические методы анализа	43

3.5.6 Физические методы анализа	45
3.5.7 Дистанционное зондирование и ГИС	46
3.5.8 Методы взятия образцов и обработки	48
ГЛАВА 4 Оценка загрязненности почв Красноярского края	51
4.1 Экологическое состояние почвенных ресурсов Красноярского края	51
4.2 Сбор данных.....	53
4.2.1 Подготовительный период.....	53
4.2.2 Рекогносцировочное обследование	53
4.2.3 Отбор и методика изучения почвенных образцов.....	56
4.3 Полученные результаты.	64
4.4 Оценка фитотоксичности исследуемых почвенных проб	70
Заключение	73
Практические рекомендации	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	78

Введение

Арктическая зона Российской Федерации – это уникальная и важная территория, богатая природными ресурсами, но одновременно подверженная серьезным экологическим угрозам. Экологические проблемы загрязнения почв в этой области приобретают все более актуальный характер в свете глобальных изменений, затрагивающих физико-географическую характеристику территории и функционирование почв.

Интенсивное промышленное развитие, транспортные маршруты, иные антропогенные деятельности, а также изменения климата существенно влияют на экосистемы Арктики. Это создает не только уникальные экологические вызовы, но и требует новых подходов и исследований для более глубокого понимания последствий загрязнения почв в данной области.

В настоящее время в Арктике происходит интенсивная индустриализация и урбанизация, что приводит к деградации вечной мерзлоты, образованию новых типов почвы и растительности, изменению скорости минерализации органического вещества и степени его гумификации. В связи с этим важен анализ того, насколько почвы урбанизированных экосистем отличаются от фоновых экосистем по содержанию и запасам углерода.

Актуальность данного исследования проявляется в неотложной необходимости понимания и решения экологических проблем загрязнения почв в Арктической зоне РФ, включая Красноярский край, в контексте глобальных изменений климата и роста антропогенной деятельности. Эти экологические вызовы имеют прямое воздействие на здоровье человека и сохранение уникальных экосистем Арктики. Так же исследования данной проблемы являются критически важными для устойчивого развития региона и сохранения природных ресурсов.

Новизна данного исследования проявляется в его уникальном подходе к комплексному анализу экологических проблем загрязнения почв в

Арктической зоне РФ, особенно в Красноярском крае, с учетом влияния глобальных изменений климата и разработки практических рекомендаций для устойчивого управления этими проблемами. Интенсификация антропогенного воздействия на природные и городские ландшафты Красноярского края требует изучения причин, механизмов и последствий этих воздействий. Почва является важнейшим звеном функционирования геохимических потоков в ландшафте и выполняет функции аккумуляции, перераспределения, трансформации химических элементов [19], поэтому важной представляется работа по исследованию загрязнения почв.

Цель настоящей магистерской диссертации заключается в проведении комплексного анализа экологических проблем загрязнения почв в Арктической зоне РФ, с акцентом на Красноярском крае, и оценке степени загрязненности почв тяжелыми металлами.

Для достижения данной цели, следует решить следующие задачи:

1. Провести физико-географическую характеристику территории Арктической зоны РФ, включая Красноярский край.
2. Исследовать функционирование почв в условиях глобальных изменений климата и экосистем.
3. Проанализировать экологические проблемы загрязнения почв Арктической зоны РФ.
4. Оценить степень загрязненности почв некоторых городов Красноярского края.

Таким образом, данная магистерская диссертация представляет собой важное исследование, которое способствует пониманию экологических аспектов Арктической зоны РФ и содействует разработке устойчивых стратегий управления почвенными ресурсами в условиях глобальных изменений.

ГЛАВА 1 Физико-географическая характеристика арктической зоны РФ и Красноярского края

1.1 Физико-географическое описание Арктической зоны РФ

Арктическая зона России – это обширная территория, простирающаяся на севере страны и включающая в себя следующие характерные особенности:

Большая часть арктической зоны покрыта льдами и вечной мерзлотой. Это создает жесткие условия для жизни и сельского хозяйства.

Арктическая зона характеризуется суровыми климатическими условиями с длительными и холодными зимами, когда температуры могут опускаться до -50°C и холодными летними месяцами.

В этой зоне обитает множество уникальных видов животных, таких как белые медведи, лоси, тюлени, а также множество видов птиц, что делает ее важным регионом для биологического разнообразия [31].

Арктическая зона малонаселена из-за неблагоприятных условий для человеческой жизни. Основное население составляют коренные народы, такие как чукчи, эскимосы и ненцы.

Экономика этой зоны зависит от добычи природных ресурсов, таких как нефть, газ, рыба и морская живность. Она также играет важную роль в обеспечении российской безопасности и обороны из-за своего стратегического местоположения [49].

Арктическая зона особенно уязвима для изменения климата, с таянием льдов и поднятием уровня морей, что вызывает беспокойство в связи с глобальными экологическими вызовами.

Так же особенностью Арктической зоны является наличие полярного дня и ночи. Это означает, что солнце может светить круглосуточно в летние месяцы и быть полностью скрытым зимой. Это оказывает влияние на биологические ритмы живых организмов и повседневную жизнь жителей.

Арктическая зона богата уникальной природой, включая арктические пустыни, высокогорные районы, морские ледяные плато и богатые водами арктические океаны.

Изменение климата, промышленная деятельность и загрязнение среды представляют серьезные экологические угрозы для этой зоны, что может повлиять на биоразнообразие и климатическую устойчивость не только в России, но и во всем мире.

Эти физико-географические особенности делают арктическую зону России уникальным и важным регионом, требующим особого внимания в связи с вызовами изменения климата и сохранением природных ресурсов.

1.2 Физико-географическое описание Красноярского края

Красноярский край представляет собой одну из самых климатически суровых территорий в России. По статистике Росстата, здесь проживает около 2,8 миллиона человек, из них в арктической зоне - более 237 тысяч человек [Росстат, 2023]. Несмотря на то, что Арктическая зона Красноярского края является малонаселенной, в ней проживают различные этнические группы, включая коренные народы сибирского Севера, такие как ненцы, ханты, селькупы и другие. Их культура и образ жизни тесно связаны с природой и традиционным рыболовством, охотой и скотоводством.

Край располагается в Центральной и Восточной Сибири, в бассейне реки Енисей. На севере - имеет выход к морю Лаптевых Карскому морю, включая архипелаг Северная Земля, острова Норденшельда, Вилькицкого, Сибирякова, Диксон. На юге граничит с Республикой Тыва [20].

На территории края выделяют арктический, субарктический и умеренный климатические пояса. В связи с большой протяженностью региона климат края очень неоднороден.

В северной части края, на Таймырском полуострове климат характеризуется длительной зимой с сильными ветрами и высокой

влажностью. Населению этих мест приходится сталкиваться с холодом каждый день, поскольку безморозный период практически отсутствует. Температура воздуха постоянно колеблется в районе ноля и ниже градусов, создавая серьезные вызовы для местных жителей.

В центральной части края, которая представляет собой равнинную местность, климат несколько иной. Здесь лето отличается относительной жарой, но зато его длительность невелика. Затем идет долгая и холодная зима, во время которой температура может значительно снижаться. Жители этих территорий привыкли к большим колебаниям температур и приспособились к условиям климата.

В южной части климат более умеренный. Здесь лето длительное и теплое, позволяющее людям наслаждаться относительно комфортными температурами. Зима же не так холодна, как в северных районах края.

Рельеф Красноярского края представляет собой разнообразную мозаику природных форм. По краю протекает мощная река Енисей, которая создала глубокую долину между двумя тектоническими структурами. С правой стороны долины расположены извилистые уступы, на которых образовалось Среднесибирское плоскогорье и Енисейский кряж, состоящие из сложных древних пород. А на левом берегу реки простирается Западно-Сибирская низменность, которая на севере смыкается с обширной Енисейско-Хатангской низменностью, занимающей часть Таймырского полуострова [20, 31].

Южная часть Красноярского края представляет собой уникальную совокупность гор и межгорных впадин Алтае-Саянской горной страны. Здесь возвышаются массивные горы, создавая впечатляющие пейзажи, и образуются живописные ущелья и долины. Эти горы являются средоточием природных богатств и источником многих рек, в том числе и Енисея.

Среднесибирское плоскогорье, состоящее из песчаников, известняков, сланцев и угля, поражает своим разнообразием горных форм. Во многих

местах плоскогорья можно наблюдать магматические излияния, такие как траппы, которые придают этим местам особый характер.

Особое место на Среднесибирском плоскогорье занимает плато Путорана, которое выделяется своей высотой. Некоторые его части поднимаются на высоту более 1600 метров, а самая высокая точка – гора Камень – достигает высоты 1701 метр. Плато Путорана – это уникальный уголок природы, где сочетаются величие гор и красота пейзажей [20].

В крае можно найти разнообразные виды животных, включая медведей, лосей, лисиц, северных оленей, а также многочисленные виды птиц и рыбы. Регион также богат разнообразием растительности, присущей северным ландшафтам.

Основой экономики этой зоны являются добыча полезных ископаемых, таких как нефть и газ, а также лесозаготовка и рыболовство. Этот регион также важен для обеспечения российской энергетики из-за многочисленных гидроэлектростанций на реках. В Норильске базируется производство алюминия, никеля, кобальта, меди, платины, золота и других металлов. Цветная и чёрная металлургия дают более 50% промышленной продукции края. Ведется разработка более 1200 месторождений природных ископаемых: свинца, цинка, магнезитов, золота, природного камня, нерудных строительных материалов, а также нефти, газа и угля [31].

Эти физико-географические особенности делают арктическую зону Красноярского края важным регионом для биоразнообразия, экономики и стратегической значимости, но также подверженным вызовам, связанным с изменением климата и природопользованием.

Регион имеет стратегическое значение для России из-за его местоположения на севере страны. Он играет важную роль в обеспечении национальной безопасности и является важной транспортной магистралью для доставки ресурсов. Расположение арктической зоны Красноярского края приближает регион к Северному морскому пути, который становится все

более доступным из-за изменения климата и позволяет сократить маршрут между Европой и Азией, что придает ему геополитическое значение [20].

1.3 Роль почвенного покрова в экосистеме Арктического региона

Почва является основой для производства пищевых культур и жизненно важных растений, а также обеспечивает многие экосистемные услуги. Она представляет собой сложную материю, состоящую из минеральных и органических частей, а также микроорганизмов, которые выполняют ряд функций.

Почва играет важную роль в Арктическом регионе, так как является ключевым компонентом экосистемы, и как правило, характеризуются низкой температурой и недостатком органических веществ, что затрудняет жизнь растительного и животного мира.

Арктические почвы связаны с вечной мерзлотой, а их свойства обусловлены преимущественно действием криогенных процессов. Эти процессы обусловлены наличием и подвижностью незамерзшей почвенной воды, которая мигрирует по температурному градиенту к фронту мерзлоты в мерзлой системе, питая ледяные тела в почве. Эти криогенные процессы приводят к образованию на поверхности почвы различных узорчатых типов грунта. В почве они порождают уникальные макроморфологические особенности, такие как криотурбированные почвенные горизонты и зернистые, пластинчатые, глыбовые и массивные структуры почвы, а также микроморфологические особенности, такие как округлые, сусцитовые, конгломерные, чечевицеобразные, гранитные и глыбовые ткани с отсортированными и ориентированными скелетными зёрнами. pH арктических почв сильно варьируется и в большинстве случаев зависит от химического состава исходных материалов. Хотя в этих почвах обычно мало питательных веществ, особенно азота, криотурбированные минеральные и

органические почвы содержат большое количество углерода и действуют как поглотители углерода.

Арктические почвы хранят около половины мирового почвенного углерода [19]. На сегодняшний день преобладает мнение, что низкие температуры являются основным средством запаса углерода, хранящегося в замороженном состоянии в вечной мерзлоте. Известно, что широко распространенное присутствие вечной мерзлоты, тесно связанное с температурой окружающей среды, в настоящее время сдерживает разложение органики арктических почв.

В арктических почвах в настоящее время отсутствуют многие виды почвенных организмов, которые являются ключевыми факторами разложения в более низких широтах. Почвенные деструкторы (такие как мокрицы, многоножки или виды дождевых червей), а также микробные организмы могут замедлять скорость разложения органического вещества почвы в Арктике. Вследствие наличия открытых ниш и функциональных ограничений, глобальным изменением климата, возможно появление организмов с дополнительными функциями, например, теми, которые стимулируют биотурбацию более глубоких слоев почвы или вызывают высокую скорость фрагментации подстилки. В итоге это способствует увеличению функционального разнообразия и может значительно стимулировать разложение.

Несмотря на это, почвы Арктики играют важную роль в круговороте веществ и воды, а также в регулировании климата.

Кроме того, почва Арктики важна для обеспечения пищевой безопасности местных жителей и для поддержания традиционных способов жизни. Она также является источником минеральных ресурсов, таких как медь, никель, железо и золото [1].

В связи с изменением климата и антропогенной деятельностью, почвы Арктики становятся уязвимыми и подвергаются разрушению. Повышение температуры и сокращение периода снежного покрова приводят к

увеличению распространения растительности и, следовательно, к изменению состава почвы. Разработка природных ресурсов и инфраструктуры также могут приводить к разрушению почвенного слоя и изменению экосистемы Арктики [31].

Почвенный покров также является важным фактором водного и гидрологического цикла. Арктические водно-болотные угодья, известные как источники выбросов мощного парникового газа метана (CH_4). Эти почвы, покрывающие более 80 процентов территории арктических и бореальных биомов, удаляют метан из атмосферы. Однако основные механизмы, экологический контроль и даже масштабы поглощения метана арктической почвой остаются загадкой.

Вода, которая попадает на почву, может либо просочиться вглубь, обогащая водородный баланс почвы, либо стекать по поверхности, увлекая с собой минеральные вещества и питательные вещества для других организмов.

Таким образом, почвенный покров Арктики играет важную роль в поддержании биологического разнообразия региона, баланса углерода и водного цикла, а также в регулировании климата на мировом уровне. Сохранение и восстановление здоровых почвенных экосистем Арктики имеет критическое значение для поддержания жизни на Земле.

1.4 Уязвимость почвенного покрова в Арктическом регионе

Почвы арктических регионов России имеют свои особенности, которые связаны с экстремальными условиями климата и природных процессов, происходящих на этих территориях. В этих регионах почвы образовались в условиях постоянного мороза, что называется «почвенным криогенезом».

Одной из особенностей почв арктических регионов является низкая температура почвенного слоя, которая может достигать -10 градусов Цельсия и ниже. Это приводит к замедлению биологических процессов в почве и

затрудняет разложение органических веществ. Кроме того, многие виды растительности не могут расти на таких почвах, что приводит к ограниченности биологического разнообразия [14].

Другой особенностью почв арктических регионов является наличие вечной мерзлоты – слоя почвы, который постоянно замерзает и тает в течение года. Это приводит к образованию сложной структуры почвы и затрудняет проникновение влаги и питательных веществ вглубь почвенного слоя. Кроме того, при размораживании вечной мерзлоты может происходить эрозия почвы.

В настоящее время в Арктике происходит интенсивная индустриализация и урбанизация, что приводит к деградации вечной мерзлоты, образованию новых типов почвы и растительности, изменению скорости минерализации органического вещества и степени его гумификации [1]. В связи с этим важен анализ того, насколько почвы урбанизированных экосистем отличаются от фоновых экосистем по содержанию и запасам углерода.

В процессе урбанизации растительное сообщество арктических городов существенно меняется. В настоящее время изменения растительного сообщества включают бореализацию арктической флоры [6]; инвазия более южных, в том числе инвазионных, видов растений [27]; увеличение доли древесных и травянистых пород [35], что может привести к изменению состава предшественников гумификации. Таким образом, можно предположить, что состав гумуса в городских почвах будет отличаться от такового в фоновых зональных почвах. В связи с этим, почвы арктических регионов являются уязвимыми и требуют особого подхода к использованию. Разработка и внедрение устойчивых методов земледелия и эксплуатации ресурсов должны учитывать особенности почвенного криогенеза, чтобы минимизировать воздействие на экосистемы и сохранить биоразнообразие в этих регионах [42].

Почвы арктических регионов являются очень уязвимыми и чувствительными к воздействию человеческой деятельности и изменениям

климата. В настоящее время различные формы экономической деятельности, такие как горнодобывающая, нефтегазовая и лесозаготовительная, имеют серьезный негативный влияние на экосистемы арктических регионов. Разрушение ландшафта, загрязнение почв и водных ресурсов, уничтожение и изменение природных местообитаний животных и растительности, введение инвазивных видов – это только некоторые из проблем, с которыми сталкиваются почвы арктических регионов [50].

Холодная, влажная почвенная среда с коротким летом замедляет разложение органического вещества и минерализацию питательных веществ в почвах арктических экосистем, а данные условия приводят к накоплению менее гумифицированного вещества, чем в почвах, сформировавшихся в экосистемах нижних широт.

Большинство горизонтов подстилки, мохового оочеса и гумусового горизонта из тундровых почв имеют высокое соотношение C:N, что указывает на более низкую степень разложения или гумификации.

Из-за постоянной заморозки почва в арктических регионах образуется очень медленно, и процессы обновления и восстановления почвы занимают многие годы. Изменения в составе почвы, например, вследствие использования химических удобрений или интенсивной эксплуатации почвы, могут привести к серьезным последствиям, которые могут быть необратимыми на протяжении десятилетий [48].

Существование вечной мерзлоты в арктических регионах обеспечивает стабильность почвы и экосистемы. Однако при изменении климата, пермафрост может начать таять и вызывать деформацию почвы, увеличение эрозии, изменение гидрологического режима и другие негативные последствия [36].

Другой отличительной характеристикой служит низкая продуктивность и биологическое разнообразие. Из-за низкой температуры и ограничений на доступность питательных веществ для растений, почвы арктических

регионов обычно не очень плодородны. Это ограничивает биологическое разнообразие и возможности использования этих территорий.

Из-за всех этих факторов, почвы арктических регионов представляют особый интерес для научных исследований, а также для разработки устойчивых стратегий использования и сохранения этих территорий. Важно учитывать уязвимость почв в Арктике при разработке стратегий эксплуатации ресурсов и защите экосистем [31, 42].

Благодаря этим уникальным характеристикам почвы, подверженные воздействию вечной мерзлоты (обычно называемые почвами вечной мерзлоты), дифференцированы на самых высоких уровнях в большинстве национальных и международных систем классификации почв. Этот процесс играет важную роль в питательном балансе почв и формировании гумуса. Кроме того, изменение климата также увеличивает уязвимость почв арктических регионов. Резкое изменение температуры и осадков может приводить к изменению химического состава почвы, нарушению ее структуры и свойств, увеличению эрозии и деградации. Все эти факторы вместе делают почвы арктических регионов особенно уязвимыми и требующими внимательного отношения со стороны общества и правительств [42].

Согласно ежегодному отчету Всемирной Метеорологической Организации [55], климат продолжает меняться повсюду – от вершин гор до глубин океана. В 2022 году засухи, наводнения и жара затронули население всех континентов и привели к многомиллиардным потерям. Уровень морского льда в Антарктике упал до рекордно низкого уровня, а таяние некоторых европейских ледников достигло буквально беспрецедентных темпов. Таяние вечной мерзлоты происходит повсеместно в горах и на равнинах Арктики, что приводит к выбросу огромного количества климатически активных газов в атмосферу и биогенных элементов в гидросферу [55]. Вечная мерзлота играет огромную роль в накоплении и

отложении органического углерода в педосфере Земли, а вечная мерзлота имеет решающее значение для будущего изменения климата.

ГЛАВА 2 Функционирование почв в условиях глобальных изменений: факторы, современное состояние

2.1 Факторы, влияющие на почвы криолитозоны

2.1.1 Климатические изменения и их влияние на состояние почв

Криолитозона – это географическая зона, характеризующаяся присутствием вечной мерзлоты в почвенном профиле в течение большей части года. Она находится в областях с холодным климатом, где среднегодовая температура ниже нуля градусов Цельсия.

Вечная мерзлота является важным компонентом криосферы, занимая площадь примерно $1,06 \times 10^6$ км² [54]. Будучи водоупорным слоем, вечная мерзлота может эффективно регулировать поверхностный сток и гидравлическую связь между поверхностными и грунтовыми. Характеристики и изменения вечной мерзлоты могут влиять на водно-теплообмен и углеродный цикл между сушей и атмосферой, тем самым влияя на региональный климат.

В зимнее время слой снега изолирует землю от холодного воздуха, вызывая смещение поверхности; т. е. земля теплее воздуха. Осадки изменяют теплопроводность приповерхностных слоев, например, за счет контроля водного баланса почвы.

Вероятно, реакция наземного теплового режима полушария на атмосферное воздействие также зависит от его начального теплового состояния. В условиях вечной мерзлоты изменения температуры отстают из-за более высоких затрат энергии на фазовые изменения воды в активном слое (т.е. скрытый теплообмен), тогда как в почвах умеренного пояса климатический сигнал более непосредственно влияет на тепловой режим грунта. Помимо влияния содержания подземного льда на теплообмен, его развитие является важным геоморфическим фактором.

В криолитозоне вечная мерзлота пронизывает слои почвы на значительную глубину, обычно до нескольких метров. Вечная мерзлота представляет собой слой грунта, который остается замерзшим на протяжении большей части года из-за недостатка тепла. Важно отметить, что вечная мерзлота не является постоянно замерзшей, она может размораживаться на короткий период в летние месяцы.

Одним из основных последствий климатических изменений является оттаивание вечной мерзлоты. Под воздействием повышения температуры, верхние слои мерзлоты начинают размораживаться, что приводит к изменениям в физических, химических и биологических свойствах почвы.

Повышение температуры влияет на гидрологический режим почвы. Расплавление вечной мерзлоты приводит к образованию глубинных талых вод, которые могут вызывать затопление поверхности и создавать проблемы с дренажем. Это может привести к ухудшению условий для растительности и изменению биологических процессов, связанных с разложением органического вещества в почве [9].

Изменение осадков также оказывает влияние на почвы криолитозоны. Увеличение или уменьшение количества осадков может привести к изменению влагообеспеченности почвы. Это может повлиять на режим роста растений и активность микроорганизмов, которые играют важную роль в биологических процессах, таких как разложение органического вещества и цикл углерода.

Более высокие температуры и изменения водного режима также могут способствовать увеличению активности микроорганизмов в почве. Это может привести к усилению процессов разложения органического вещества и высвобождению хранимого в нем углерода в атмосферу в виде углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4), что сказывается на глобальном уровне, усиливая парниковый эффект.

Кроме того, климатические изменения могут повлиять на распределение и распространение растительного покрова в зонах

криолитозоны. Изменение температурных режимов и доступности воды может привести к сдвигам в границах распространения растений, изменению видового состава и структуры растительного сообщества. Это в свою очередь оказывает влияние на органическое вещество, накапливающееся в почве, и процессы, связанные с его разложением.

Климатические изменения также могут повлиять на геоморфологические процессы в почвах криолитозоны. Расплавление вечной мерзлоты может приводить к образованию селевых потоков, обвалов и сдвигов почвенного материала. Это может вызывать эрозию почвы и изменение ее структуры и свойств [9].

Все эти изменения в состоянии почв криолитозоны, вызванные климатическими изменениями, имеют далеко идущие последствия для экосистем, углеродного цикла и сельскохозяйственного производства. Углерод, накопленный в почве криолитозоны на протяжении тысячелетий, может быть высвобожден в атмосферу, способствуя глобальному потеплению. Изменение физических, химических и биологических свойств почв также может влиять на плодородие и возможности использования этих земель для сельского хозяйства и других форм хозяйственной деятельности.

2.1.2 Геология Арктики

На территории российского сектора Арктики выделено несколько крупнейших структур – седиментационных бассейнов. К ним относятся Баренцево-Северокарский, Южно-Карский, Лаптевский и Восточносибирско-Чукотский. В Баренцево-Северокарский бассейн входит Свальбардская плита, Баренцевоморский мегапрогиб, Северо-Карская плиты. Южно-Карский бассейн имеет как внутреннюю, так и внешнюю стороны. К внешней относятся Вайгач-Новоземельская и Притаймырская моноклинали, Северо-Сибирский порог, Западно-Карская и Восточно-Карская террасы. Внутренней зоне соответствует Южно-Карская впадина. Лаптевский бассейн

разделяется на две области – Западно-Лаптевскую и Восточно-Лаптевскую. Они осложнены системой горстов, грабенов, поднятий, прогибов и сбросов. Восточносибирско-Чукотский седиментационный бассейн расположен от Новосибирских островов до полуострова Аляска. В его пределах выделяют поднятие Де Лонга, прогиб Вилькицкого, Чукотскую платформу, Новосибирский прогиб, Жоковскую впадину, Джара-Кюельское поднятие, Благовещенскую структурную террасу, Шелагское поднятие, Айонскую впадину, Врангелевско-Геральдскую гряду и Южно-Чукотский прогиб [19].

Арктика имеет геологически активное прошлое. Вулканическую активность в национальном заповеднике Берингов Сухопутный мост можно проследить до событий, произошедших от 26–28 миллионов лет назад до 1000 лет назад. Отложения вулканического пепла помогают сохранить нетронутыми, замороженные остатки тундры ледникового периода со времен сухопутного моста. Эти вулканы оставили свой след в ландшафте, включая крупнейшие маарские озера в мире. Такое взаимодействие вулканической активности в ландшафте, где преобладает вечная мерзлота, уникально для Арктики.

На севере Евразии, от побережья Белого моря до п-ва Таймыр в основании 300м толщи четвертичных отложений преобладают морские отложения, синхронные с озерными осадками. Отложения представлены трансгрессивными песками, галечниками и супесями, переходящими в суглинисто-глинистые осадки литоральной зоны трансгрессивного морского бассейна.

Почвообразующие породы включают рыхлые отложения: пески и супеси, легкие и средние суглинки, тяжелые суглинки и глины, двучленные отложения (пески и супеси на суглинках и глинах), суглинки с участием жильных льдов. Большие площади занимают рыхлые породы с включением обломков твердых пород: щебнистые и валунные пески и супеси, щебнистые суглинки, щебнистые суглинки карбонатные. В долинах и дельтах рек

выделяются аллювиальные отложения смешанного состава (пески, суглинки), аллювиальные отложения со слоями торфа [12].

В районе Красноярского края наблюдается следующий рисунок земной поверхности: сортированные круги, грязевые нарывы, клеточные формы, солифлюкционные (полосатые) формы и крупные полигоны (тундровые полигоны). Почвы, связанные с этими формами, часто имеют разные морфологические, гранулометрические и химические свойства и растительный покров.

Тундровые полигоны и поверхности без рельефа обычно сопровождаются сравнительно хорошо развитыми бурыми почвами с плотным растительным покровом (70–100%). Такие формы встречаются преимущественно на суглинистых песках и суглинках с обильным содержанием частиц размером 1,0–0,1 мм. Бурые почвы богаты гумусом, количество которого с глубиной уменьшается. Типичные глеевые почвы, обычно со скудным растительным покровом, связаны с ячеистыми формами, сортированными кругами и грязевыми нарывами. Солифлюкционные формы обычно сопровождаются глеевидными почвами, реже буроподобными.

Низкие температуры и сезонное замерзание и оттаивание приводят к сильным силам пучения, дифференциальному оседанию оттаивания, образованию сегрегированного и массивного льда и ошеломляющему разнообразию структурных особенностей грунта. Поскольку подстилающая вечная мерзлота препятствует подземному дренажу, почвы часто бывают влажными и холодными, что сильно влияет на окисление/восстановление, разложение и другие биогеохимические процессы.

2.1.3 Биологические процессы и их роль в трансформации почв

Вечная мерзлота уникальна среди почв мира, поскольку на ее форму и функцию сильно влияют низкие температуры и наличие многолетнемерзлой почвы под сезонно-талым слоем. В трансформации почв криолитозоны

играют важную роль биологические процессы. Они включают в себя деятельность микроорганизмов, растений и животных, которые взаимодействуют с почвенным материалом и влияют на его состав, структуру и функции. Низкие скорости разложения, криотурбация в результате процессов замораживания-оттаивания и условия осадконакопления, относящиеся к плейстоцену, привели к накоплению больших запасов органического углерода в деятельном слое и подстилающей многолетней мерзлоте.

Растения играют ключевую роль в трансформации почвы криолитозоны. Они проникают корнями в почвенный профиль, способствуя его разрыхлению и улучшению структуры. Растения также выполняют функцию поставщиков органического материала через опавшие листья и отмершие корни. В результате этого почвенный покров становится более устойчивым к эрозии и более плодородным [8].

В почвах криолитозоны органический материал, такой как растительные остатки и животные отходы, разлагается под влиянием микроорганизмов. Бактерии, грибы и другие декомпозеры расщепляют органические вещества, высвобождая питательные вещества и обогащая почву. Микроорганизмы в почвах криолитозоны играют важную роль, обеспечивая разложение органического материала, улучшение структуры почвы. Они выполняют функции биологического контроля патогенных микроорганизмов и участвуют в циклах питательных веществ. Некоторые микроорганизмы, такие как бактерии-азотфиксаторы, способны преобразовывать атмосферный азот в доступную для растений форму.

Животные, населяющие почву криолитозоны, такие как черви, насекомые, наземные животные и микроорганизмы, также играют важную роль в трансформации почвенной среды. Например, черви улучшают почвенную структуру своей активностью по вертикальному перемешиванию почвенных слоев и обогащают ее органическими веществами через свои отходы [7]. Другие животные, такие как насекомые, микроорганизмы и

наземные животные, вносят свой вклад в процессы разложения органического материала и циркуляцию питательных веществ в почве [17].

2.2 Современное состояние почв криолитозоны

2.2.1 Типы почв криолитозоны и их распространение

На территории России большую часть территорий занятой многолетнемерзлыми породами, до 61,8% занимает область криолитозоны сплошного типа, ее границы охватывают большую часть арктических островов и тянутся почти непрерывно вдоль побережья от Карского моря и до Чукотского моря на востоке, проникая вглубь континента в Центральной Сибири и в Якутии.

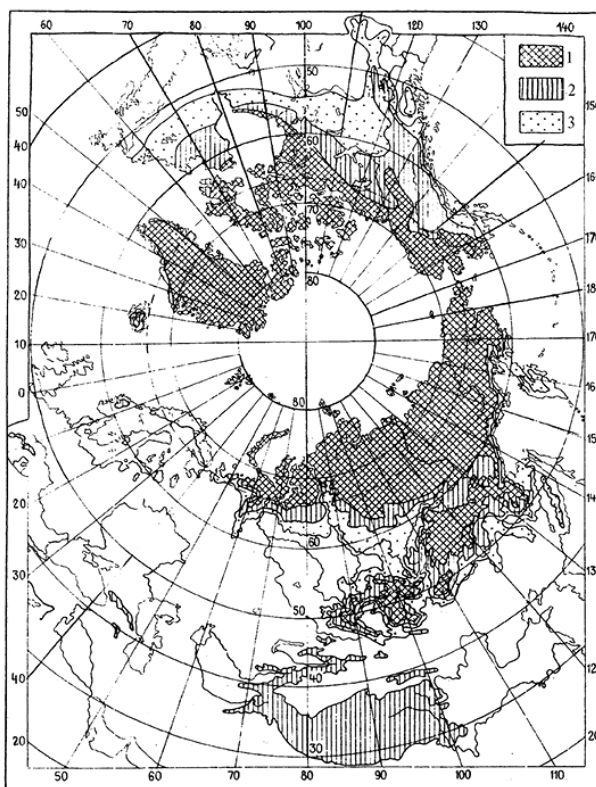


Рисунок 1 – Геокриологическая карта Северного полушария. Криолитозона: 1 – сплошная, 2 – прерывистая, 3 – островная [18]

Криолитозона островного типа занимает 21,2% простирается от Кольского п-ова до побережья Японского моря, Сахалина и Камчатки. Наименьшую площадь 17% имеет область криолитозоны островного типа, она располагается между областями сплошного и островного типов криолитозоны. Наиболее широко многолетняя мерзлота распространена на севере Западной Сибири, в Восточной Сибири и Забайкалье [18].

В таблице 1 приведено зональное районирование Арктики и Субарктики с приведением характерных для данных регионов почв и особенностей почвообразования.

Таблица 1 – Зональное районирования Арктики и Субарктики [12]

Зональное районирование почвенного покрова			
Зональные выделы	Низкоарктическая тундра	Среднеарктическая тундра	Высокоарктическая тундра
Почвы	Торфяно-глееземы, глееземы криометаморфические, органо- и дерново-криометаморфические, текстурно-криометаморфические, подзолистые, подзолы, подбуры, криоземы, торфяные	Криометаморфические, торфяно-глееземы, криоземы, подбуры, торфяные, дерновые грубогумусированные, перегнойно-темногумусовые, остаточно-карбонатные	Почвопленки, петроземы, местами засоленные, псаммоземы, дерновые грубогумусированные, торфяно-литоземы, перегнойно-темногумусовые, остаточно-карбонатные
Характерные особенности почвенного покрова	преимущественно сплошной почвенный покров, распространены орфяники и мерзлотные бугры	в большей степени разорванный почвенный покров, подстилка маломощная и местами неразвита	почвенный покров распространен пятнисто, засоленные почвы смежны с торфяно-литоземами, развитие привноса-уноса вещества

Распространение этих типов почв в криолитозоне России может быть разнообразным и зависит от множества факторов, включая климатические условия, геологическую и геоморфологическую природу региона. В России криолитозона занимает значительную часть территории, особенно на Сибири и на Дальнем Востоке, где различные типы почв криолитозоны могут быть обнаружены в различных комбинациях и вариациях [12].

2.2.2 Изменения, происходящие в почвах криолитозоны в результате глобальных изменений

Существует два основных типа вечной мерзлоты. Наиболее распространенным типом является старая многолетняя мерзлота, остаток палеоклимата, а другой тип сформировался позднее, в современных условиях. Древняя вечная мерзлота широко распространена на равнинах и холмах северной приполярной области. Большая часть этой реликтовой вечной мерзлоты является полигенетической, поскольку сингенетическая вечная мерзлота развилась на эпигенетической вечной мерзлоте. Примерами могут служить едомские свиты на северо-востоке России, в Арктике и бореальной Аляске, а также регионы Юкона в Канаде [53]. Едому еще называют «Ледяным комплексом» из-за огромных клиньев льда, образовавшихся в мощных отложениях сингенетического происхождения (т.е. одновременного роста отложений вверх и поверхности вечной мерзлоты). Большая часть эпигенетической вечной мерзлоты (которая развивается на существующих отложениях) образовалась на возвышенностях, таких как ледниковые возвышенности Северной Америки.

Второй, более современный вид вечной мерзлоты образовался в голоцене в результате дегляциации с последующей сменой растительности в холодных климатических условиях и расположен преимущественно в субарктических и бореальных регионах.

Глобальные изменения, такие как изменение климата и глобальное потепление, оказывают значительное влияние на почвы криолитозоны.

Одним из наиболее очевидных и важных последствий глобального потепления является таяние мерзлоты. Под влиянием повышения температуры в верхних слоях грунта мерзлота начинает таять, что приводит к физическим и химическим изменениям в почвенном профиле. Таяние мерзлоты может приводить к формированию глубоких трещин, обрушениям почвенных склонов, изменению водно-воздушного режима и перераспределению питательных веществ [47].

Криолитозона играет важную роль в углеродном цикле Земли. В замерзших почвах криолитозоны накапливается большое количество органического вещества, которое под влиянием мерзлотных процессов медленно разлагается и превращается в гумус. При таянии мерзлоты происходит активное разложение органического вещества, что может приводить к выделению значительного количества парниковых газов, включая углекислый газ и метан. Это может усилить глобальное потепление, так как эти газы являются сильными парниковыми газами [2].

Под влиянием изменений климата и таяния мерзлоты происходят изменения в биологической активности почвенных микроорганизмов и флоры. Формируются новые условия для развития растительности и поселения микроорганизмов, что влияет на биогеохимические процессы и питательный режим почвы. Некоторые исследования также свидетельствуют о возможном расширении ареала растительных видов из южных регионов в криолитозону в результате изменения климата [15, 26].

После таяния вечной мерзлоты происходят радикальные изменения в гидрологии, почвенных условиях и растительных сообществах, которые создают существенную неопределенность относительно того, как быстро и в каком направлении оттаивание вечной мерзлоты повлияет на углеродный баланс почвы, выбросы парниковых газов и изменение климата [56].

ГЛАВА 3 Экологические проблемы загрязнения почв в арктической зоне РФ

3.1 Исторический обзор проблемы загрязнения почв

Арктическая зона Российской Федерации является уникальным экосистемным регионом, который подвергается воздействию различных экологических факторов. Загрязнение почв - одна из серьезнейших проблем, с которой сталкивается данный регион.

Проблема загрязнения почв в Арктической зоне России имеет долгую историю, которая начинается с момента освоения этих территорий человеком.

Первые признаки загрязнения почв в Арктической зоне были замечены еще в конце XIX века, когда началась промышленная эксплуатация природных ресурсов региона. Одним из первых крупных загрязнителей почв в Арктике стала добыча угля на острове Новая Земля в начале XX века. В те времена технологии добычи угля были далеко не совершенными, и в результате неэффективного использования топлива в атмосферу выбрасывались большие объемы токсичных веществ, которые затем оседали на почве [52].

В 1930-х годах проблема загрязнения почв в Арктической зоне России стала особенно актуальной в связи с распространением на территории региона различных производств, началось развитие нефтедобычи, которая сопровождалась выбросами нефтепродуктов на почву.

В 1960-е годы в Арктике начались массовые испытания ядерного оружия. В результате взрывов на островах Новая Земля и Северный были выброшены большие объемы радиоактивных веществ, которые оказали серьезное влияние на окружающую среду региона, включая почву.

С 1970-х годов в Арктике начали активно развиваться горнодобывающие отрасли, что привело к увеличению выбросов токсичных веществ в атмосферу и загрязнению почвы. Кроме того, в последние десятилетия в регионе наблюдается усиление транспортной активности, что также оказывает негативное воздействие на почву.

С 1980-х годов и далее проблема загрязнения почв в Арктической зоне Российской Федерации получила более широкое внимание со стороны научного сообщества и государственных органов. В этот период были проведены первые научные исследования по проблеме загрязнения почв в Арктике, что привело к открытию ряда новых факторов, влияющих на качество почвы.

Одним из таких факторов является глобальное изменение климата, которое оказывает значительное воздействие на состояние почв в Арктике. Согласно ежегодному отчету Всемирной Метеорологической Организации [55], климат продолжает меняться повсюду – от вершин гор до глубин океана. В 2022 году засухи, наводнения и жара затронули население всех континентов и привели к многомиллиардным потерям. Уровень морского льда в Антарктике упал до рекордно низкого уровня, а таяние некоторых европейских ледников достигло буквально беспрецедентных темпов. Таяние вечной мерзлоты происходит повсеместно в горах и на равнинах Арктики, что приводит к выбросу огромного количества климатически активных газов в атмосферу и биогенных элементов в гидросферу. Увеличение температуры воздуха и таяние льдов приводят к ускоренному вымыванию токсичных веществ из почвы и повышению содержания ртути, свинца, кадмия и других токсинов в окружающей среде.

Кроме того, с 1990-х годов проблема загрязнения почв в Арктике стала обсуждаться на международном уровне, и было создано несколько международных организаций, занимающихся исследованием этой проблемы и разработкой международных стандартов по охране окружающей среды в Арктической зоне. Важную роль в этом процессе сыграли многочисленные

научные конференции, симпозиумы и форумы, на которых обсуждались актуальные вопросы охраны окружающей среды в Арктике.

С 2000-х годов вопрос загрязнения почв в Арктической зоне Российской Федерации продолжает оставаться актуальным и требует дальнейших исследований. В этот период были проведены новые исследования, которые позволили более точно определить характеристики загрязнения почв в Арктике, а также выявить новые источники загрязнения.

Одним из основных источников загрязнения почв в Арктике остаются промышленные комплексы, особенно те, которые работают на основе ископаемых и природных ресурсов, таких как нефть, газ, уголь и металлы. Наиболее опасным для окружающей среды является нефтяная промышленность, которая может привести к серьезным авариям, таким как разливы нефти, которые могут привести к значительному загрязнению почвы [4].

Также с 2000-х годов было обнаружено, что одним из главных источников загрязнения почв в Арктике являются дальние транспортные перевозки, такие как перевозки тяжелой техники и автомобилей через ледовые дороги и пути сообщения в зимний период. Эти перевозки могут приводить к различным видам загрязнений почвы, включая загрязнение топливом и маслами.

С 2010-х и особенно с 2020-х годов проблема загрязнения почв в Арктике получила еще большее внимание со стороны научного сообщества и общественности, а также были проведены новые исследования в этой области.

Одним из главных направлений исследований в последние годы стало изучение влияния изменения климата на состояние почв в Арктике. В связи с изменением температуры, распространением льдов и снега, а также изменением режимов осадков, происходят значительные изменения в составе и свойствах почв, которые могут привести к увеличению их уязвимости к загрязнению [16].

Таким образом, с 2010-х и особенно с 2020-х годов проблема загрязнения почв в Арктической зоне Российской Федерации стала еще более актуальной и требует дальнейших исследований и разработки мер по борьбе с загрязнением, в том числе с учетом изменения климата и международной компоненты.

В процессе урбанизации растительное сообщество арктических городов также существенно меняется. В настоящее время изменения растительного сообщества включают бореализацию арктической флоры [6]; инвазию более южных, [27]; увеличение доли древесных и травянистых пород [35], что может привести к изменению состава предшественников гумификации. Таким образом, можно предположить, что состав гумуса в городских почвах будет отличаться от такового в фоновых зональных почвах

3.2 Почвы Красноярского края

Как известно, формирование почвы, в частности его верхнего плодородного слоя - процесс долгий, зависящий от многих факторов. Самыми важными из которых, безусловно, являются климатические (температура, наличие осадков, давление в атмосфере) и природные (грунтовые воды, разнообразие флоры и фауны). Для каждой природной зоны характерны свои типы почв. А Красноярский край, протянувшийся с севера на юг на огромные расстояния, относится к числу одной из самых территориально больших единиц административного деления России может похвастаться большей частью из существующих видов природных зон. Поэтому и почвы здесь многообразны (рисунок 2).

Начинаясь на севере от берегов Северного Ледовитого океана, она тянется до Южной Сибири и пересекают одни из самых суровых климатических зон: тундры с их вечной мерзлотой в самой северной части и примитивными почвами, торфяные почвы преобладают в районе полуострова Таймыр [45], где расположены арктические пустыни, центральную часть со

степями и лесостепями составляют подзолистые, торфяно-подзолистые и каштановые почвы.

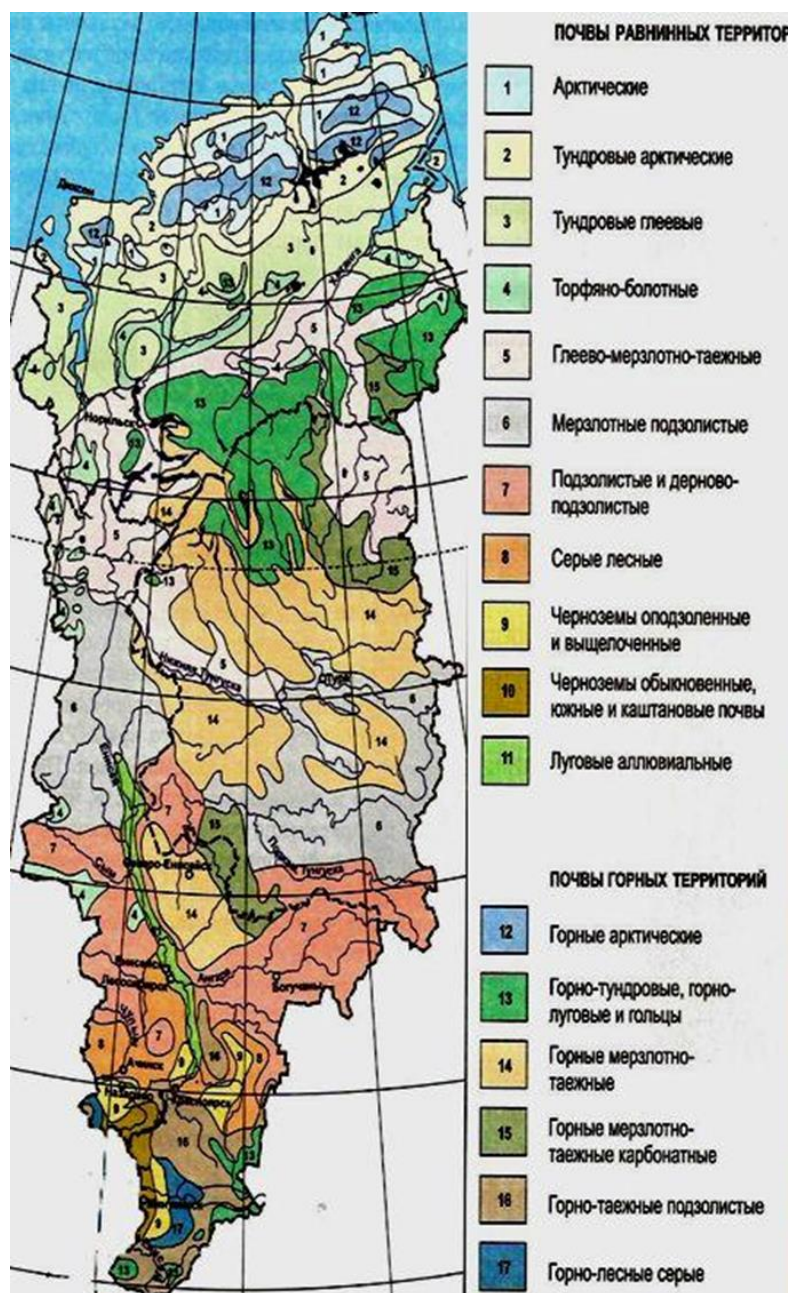


Рисунок 2 – Основные типы почв Красноярского края [20].

В районах произрастания лиственничных лесов, небольших кустарников (зона средней тайги) - подзолистые и мерзлотно-таежные почвы. Лишь в районе Минусинской котловины наличествуют черноземные почвы, обладающие высокой продуктивностью. Район Приангарья расположен на

дерново-подзолистых и мерзлотных почвах, где произрастают, в основном, темнохвойные леса.

3.3 Загрязнение почв нефтепродуктами

В российской Арктике источники загрязнения почвы нефтепродуктами включают различные человеческие деятельности, нефтедобычу и транспортировку нефти, а также аварии и несчастные случаи, связанные с нефтепереработкой и транспортировкой нефтепродуктов.

Транспортировка нефтепродуктов в Арктике осуществляется различными способами, включая трубопроводы, железные дороги, автомобильные и водные транспортные средства. Все эти виды транспорта несут потенциальные риски для загрязнения почвы нефтепродуктами.

Нефтепроводы являются основным способом транспортировки нефти в Арктике. Однако они подвержены риску аварийных ситуаций, таких как прорывы трубопроводов [3].

Утечки нефтепродуктов при авариях на нефтепроводах могут привести к серьезному загрязнению почвы вдоль маршрута транспортировки. Разливы нефти могут быть обширными и длительными, особенно если обнаружение или реакция на аварию произошли не сразу. Нефтепродукты проникают в грунт и могут распространяться на большие расстояния, загрязняя значительные площади почвы [51].

Транспортировка нефти железнодорожным транспортом также имеет риски загрязнения почвы. Несчастные случаи, такие как сход с рельсов или аварии, могут привести к разливам нефтепродуктов и загрязнению окружающей среды, включая почву вблизи железнодорожных путей. Такие разливы могут иметь небольшую масштабность по сравнению с авариями на нефтепроводах, но все же могут нанести значительный ущерб местной экосистеме.

Автомобильный транспорт также может представлять риск для загрязнения почвы нефтепродуктами в российской Арктике. Аварии с транспортировкой нефтепродуктов по дорогам могут привести к разливам и утечкам нефтепродуктов, которые могут попадать в почву вокруг места происшествия.

Транспортировка нефти по морю также не исключает возможность разлива нефтепродуктов и загрязнения почвы. Аварии и несчастные случаи на судах, используемых для перевозки нефтепродуктов, могут привести к разливам и утечкам нефти в морской среде, которые достигнут береговой линии, и загрязнят прибрежные почвы [3].

При нефтепереработке возможны различные источники загрязнения почвы нефтепродуктами. Нефтеперерабатывающие заводы обрабатывают сырую нефть и производят различные нефтепродукты, такие как бензин, дизельное топливо, мазут и другие.

Одним из основных источников загрязнения почвы при нефтепереработке является разлив или утечка нефтепродуктов в результате аварийных ситуаций на заводах. Это может произойти из-за технических сбоев, неправильной эксплуатации оборудования или несоблюдения мер безопасности. Разливы могут происходить на территории завода, а также могут проникать в почву вокруг завода.

В процессе переработки нефти также возникают отходы и отбросы, которые содержат опасные химические вещества [22]. Неконтролируемое складирование или неправильная обработка этих отходов может привести к их проникновению в почву и загрязнению ее.

Утечки могут происходить как на поверхности земли, так и под землей. При поверхностных утечках нефтепродукты попадают на поверхность почвы и могут быстро распространяться, загрязняя прилегающие участки. При утечках под землей нефтепродукты проникают в грунт и могут загрязнять его на значительной глубине, что усложняет обнаружение и очистку.

Утечки на нефтескладах и терминалах могут быть как незначительными, так и масштабными, в зависимости от многих факторов, включая количество и тип перекачиваемых нефтепродуктов, объемы операций и состояние инфраструктуры. Независимо от масштаба утечки, загрязнение почвы нефтепродуктами может иметь серьезные экологические последствия [46].

Нефтепродуктовые терминалы играют важную роль в процессе перекачки и хранения нефтепродуктов. Однако, разливы и утечки нефтепродуктов на этих терминалах могут привести к серьезному загрязнению почвы.

Хранение нефтепродуктов. Нефтепродуктовые терминалы также служат местом хранения больших объемов нефтепродуктов. В случае нарушений в системе хранения, таких как протечки резервуаров или неправильная эксплуатация системы уровня и давления, возможны разливы и утечки нефтепродуктов в окружающую среду, включая почву [51].

Однако в Арктике восстановление может быть затруднено из-за недоступности районов, ограниченного сезона активного роста и ограниченного количества органического материала для восстановления почвенной плодородности. Арктическая зона часто является уязвимой и чувствительной к изменениям, поэтому даже после восстановления почвы экосистема может оставаться уязвимой перед будущими загрязнениями и изменениями [40, 41].

Поэтому предотвращение загрязнения почвы нефтепродуктами в арктической зоне и эффективное реагирование на нефтяные разливы имеют важное значение для сохранения и защиты уникальных и уязвимых экосистем этого региона.

3.4 Загрязнение почв Арктических регионов тяжелыми металлами.

Арктика нагревается вдвое быстрее, чем в других регионах земного шара [25]. Повышение температуры приводит к многочисленным

экологическим, криосферным и гидрологическим изменениям в северных широтах. Одним из заметных последствий повышения температуры в Арктике и субарктике является повсеместное таяние вечной мерзлоты. Таяние вечной мерзлоты не только усугубляет разложение и высвобождение углерода (C) в атмосферу и прилегающие водоемы, но и тяжелые металлы, хранящиеся в вечной мерзлоте, также могут высвободиться при таянии и переноситься в поверхностные воды.

Тяжелые металлы присутствуют в арктических почвах в результате выветривания, атмосферных осадений и антропогенной деятельности, включая добычу полезных ископаемых и их переработку [24]. В ландшафтах, подверженных воздействию вечной мерзлоты, металлы могут накапливаться в мерзлых почвах. По мере продолжения потепления и таяния вечной мерзлоты потенциальный риск для здоровья человека, создаваемый выбросом тяжелых металлов в поверхностные воды и экосистемы, может усилиться.

Таяние вечной мерзлоты как фактор высвобождения тяжелых металлов, зависит от растворимости каждого элемента и окислительно-восстановительного состава, а также от того, как оттаивание меняет гидрологию пострадавшего района. Северные мерзлотные почвы хранят больше ртути (Hg), чем все другие почвы, атмосфера и океаны вместе взятые. Повышенные концентрации ртути были обнаружены ниже по течению от оттепелей [5], что свидетельствует о том, что таяние вечной мерзлоты может представлять дополнительную опасность для здоровья человека, поскольку эта ртуть может проникать в водные и пищевые ресурсы. Другие металлы могут аналогичным образом выделяться в результате таяния вечной мерзлоты. Высокие концентрации железа, марганца, никеля и цинка были обнаружены в вечномерзлых почвах на севере Сибири [42], а повышенные концентрации железа, алюминия, хрома и свинца наблюдаются в районах, переживших быстрое оттаивание [30]. Кроме того, увеличение деградации органического вещества почв во время таяния вечной мерзлоты может

повлиять на подвижность металлов, поскольку металлы, связанные с ПОВ, высвобождаются [14].

Растения также поглощают металлы из почвы, причем делают это быстрее в условиях потепления [31] и повышенного содержания CO_2 [33]. Хотя способность таяния вечной мерзлоты мобилизовать тяжелые металлы все больше признается, необходима дальнейшая работа по оценке присутствия тяжелых металлов в арктических почвах из-за их потенциального воздействия на здоровье человека.

Особенностью техногенной деятельности в Сибирской части Арктической зоны Российской Федерации является добывающая и перерабатывающая промышленность – мощный источник загрязнения, в первую очередь соединениями металлов. В связи с этим они являются приоритетными загрязнителями на данных территориях [44].

3.5 Обзор современных методов анализа почвенных проб

3.5.1 Особенности почвенных проб в Арктической зоне

Арктическая зона, расположенная в высоких широтах Северного полушария, представляет собой уникальную и хрупкую экосистему. Она характеризуется экстремальными климатическими условиями, включая низкие температуры, длительные периоды мерзлоты и ограниченную доступность воды. В таких условиях почвенный покров в арктической зоне приобретает особенности, которые отличают его от других регионов нашей планеты.

Исследование и анализ почвенных проб в арктической зоне играют важную роль в понимании функционирования этой уникальной экосистемы и ее взаимодействия с окружающей средой. Они позволяют установить

свойства и состав почвы, а также оценить ее потенциал для поддержания жизни и выполнения экологических функций.

Особенности почвенных проб в арктической зоне включают наличие мерзлоты, перманентных мокрых участков, низкую активность микроорганизмов, удаленность и недоступность, влияние климатических изменений, наличие остаточных замороженных озер и прудов, а также специфическую арктическую растительность и геологические особенности [33, 34]. Эти факторы оказывают влияние на свойства и характеристики почвы, и изучение этих особенностей позволяет более глубоко понять арктические почвенные экосистемы. Рассмотрим некоторые из них.

Мерзлота. Одной из характерных особенностей почвенного покрова в арктической зоне является наличие мерзлоты. Мерзлота представляет собой слой почвы, который остается замерзшим на протяжении большей части года. Это создает особые условия для образования и развития почвы.

Перманентные мокрые участки. В арктической зоне встречаются перманентные мокрые участки, такие как болота и трясины. Они являются особой формой почвенного покрова и имеют специфические свойства. Анализ почвенных проб с таких участков может показать наличие высокого содержания органического вещества и измененных химических свойств.

Низкая активность микроорганизмов. В условиях арктической зоны, из-за низких температур и ограниченного доступа к органическому веществу, активность микроорганизмов в почве обычно ниже, чем в более теплых регионах. Это может отразиться на составе почвенной биоты и процессах, связанных с циклом элементов [21].

Недоступность и удаленность. Многие арктические районы являются труднодоступными и удаленными. Это создает проблемы при сборе почвенных проб и их транспортировке в лаборатории для анализа. Отсутствие инфраструктуры и ограниченные сезоны доступа могут быть препятствиями для исследований почвенных свойств в этой области.

Влияние климатических изменений. Арктическая зона испытывает значительные климатические изменения, такие как таяние мерзлоты и увеличение температуры. Это может оказывать влияние на состав и свойства почвы в арктической зоне, а также на ее эрозию, стабильность и способность удерживать влагу. Такие изменения могут привести к деградации почвы и изменению ее химических, физических и биологических свойств.

Наличие остаточных замороженных озер и прудов. В арктической зоне можно найти остаточные замороженные озера и пруды, которые представляют собой специфические экосистемы. Анализ почвенных проб из таких мест может дать информацию о составе и химических свойствах осадков и отложений, а также об экологических процессах, происходящих в этих водных системах [27].

3.5.2 Физико-химические методы анализа

Физико-химические методы анализа почв в арктической зоне играют важную роль в изучении и понимании свойств почв и их взаимодействия с окружающей средой. Эти методы позволяют определить различные параметры и характеристики почвы, включая ее физические свойства, химический состав и содержание различных элементов [29].

Физико-химические методы анализа почв, которые применяются в исследованиях арктической зоны:

1. Определение физических свойств почвы. Включает измерение текстурных характеристик почвы, таких как процент содержания песка, суглинка и глины, а также определение плотности, пористости, водопроницаемости и влагоудержания почвы. Эти параметры важны для понимания структуры почвы, ее способности к удержанию влаги и проникновению корней растений.

2. Химический анализ почвы. Включает определение содержания органического вещества, pH-значения, содержания основных и следовых

элементов, таких как азот, фосфор, калий, железо, медь и другие [37]. Это позволяет оценить плодородие почвы, ее способность поддерживать растительный рост и взаимодействие с другими компонентами экосистемы.

3. Анализ пылевых отложений: Пылевые отложения на поверхности почвы в арктической зоне содержат важную информацию о истории климата и атмосферных процессах. Используя физико-химические методы, такие как спектральный анализ и химический анализ, можно определить состав пылевых частиц и их источники, включая природные и антропогенные влияния.

4. Изучение микробиологических процессов. Физико-химические методы также применяются для изучения микробиологических процессов в почве, таких как деятельность микроорганизмов, процессы денитрификации и фиксация азота. Это включает определение содержания микробной биомассы, изучение микробного метаболизма и анализ генетического состава микроорганизмов. Эти данные помогают понять роль микробов в почвенных процессах, цикле элементов и деградации почвенных ресурсов в арктической зоне.

5. Определение степени загрязнения почв. Данные методы позволяют оценить степень загрязнения почвы в арктической зоне различными токсичными веществами, включая тяжелые металлы и органические соединения. Это важно для оценки влияния антропогенной деятельности на почвенные экосистемы и принятия мер по их охране и восстановлению.

6. Изучение стабильности почвы. Физико-химические методы также используются для оценки стабильности почвенного покрова в арктической зоне. Это включает измерение кристаллической структуры минералов, степень гидролиза органического вещества и оценку устойчивости почвы к эрозии и деградации.

Физико-химические методы анализа почв в арктической зоне играют важную роль в понимании особенностей и функционирования почвенных экосистем в экстремальных условиях [29]. Они помогают раскрыть

взаимосвязи между почвенными процессами, климатическими изменениями и биологическими системами, а также вносят вклад в разработку устойчивых стратегий использования и охраны почвенных ресурсов в арктической зоне.

3.5.3 Биологические методы анализа

Биологические методы анализа арктической почвы играют важную роль в изучении биологической активности, разнообразия микроорганизмов и экологических процессов, происходящих в почвенной экосистеме. Эти методы позволяют оценить состояние и функционирование почвы, влияние климатических изменений и антропогенной деятельности на почвенные микроорганизмы и растительный покров, а также эффективность мер по охране и восстановлению почвенных ресурсов.

Некоторые биологические методы анализа арктической почвы включают в себя:

1. Оценка биомассы микроорганизмов. Этот метод позволяет определить общее количество микроорганизмов в почве, включая бактерии, грибы и активные формы микробиологической жизни. Измерение биомассы микроорганизмов помогает оценить их активность и вклад в различные почвенные процессы, такие как минерализация органического вещества и цикл элементов.

2. Анализ ферментативной активности. Этот метод позволяет изучить активность ферментов, вырабатываемых микроорганизмами, и их влияние на почвенные процессы. Измерение активности ферментов, таких как целлюлаза, липаза и другие, помогает понять разложение органического вещества, доступность питательных веществ и цикл элементов в арктической почве.

3. Генетический анализ. Современные методы генетического анализа, такие как ДНК-секвенирование и метагеномика, позволяют идентифицировать и изучать разнообразие микроорганизмов в арктической

почве. Это помогает определить и описать микробные сообщества, их функциональный потенциал и влияние на почвенные процессы.

4. Изучение растительного покрова. Биологические методы также применяются для изучения растительного покрова в арктической зоне. Это включает оценку видового разнообразия, измерение физиологических параметров растений, таких как фотосинтетическая активность, содержание хлорофилла и других пигментов, а также исследование влияния окружающей среды на рост и развитие растений.

5. Изучение взаимодействия растений и микроорганизмов. Биологические методы позволяют исследовать симбиотические взаимодействия между растениями и микроорганизмами, такие как микоризные грибы, которые помогают растениям поглощать питательные вещества из почвы. Это также включает изучение влияния растений на микробные сообщества и их вклад в почвенные процессы.

6. Оценка биологического разнообразия. Биологические методы позволяют оценить биологическое разнообразие арктической почвы, включая микробное разнообразие, разнообразие растений и других организмов. Изучение разнообразия позволяет понять структуру почвенной экосистемы, ее устойчивость и реакцию на изменения в окружающей среде.

Биологические методы анализа арктической почвы являются неотъемлемой частью исследований этой уникальной экосистемы. Они позволяют получить информацию о биологической активности, разнообразии и функционировании почвенной экосистемы в условиях арктической зоны. Эти данные играют важную роль в понимании арктических почвенных процессов, их устойчивости и реакции на климатические изменения, а также в разработке стратегий охраны и устойчивого использования почвенных ресурсов в арктическом регионе [35].

3.5.4 Молекулярные методы анализа

Молекулярные методы анализа арктических почв являются мощным инструментом для изучения генетического разнообразия микроорганизмов и их функционального потенциала, а также для выявления влияния окружающей среды и антропогенной деятельности на почвенные экосистемы. Эти методы позволяют более подробно изучать состав микробных сообществ, генетические адаптации и взаимодействия между микроорганизмами и окружающей средой.

Молекулярные методы анализа арктических почв:

1. ДНК-секвенирование позволяет определить генетическую информацию, содержащуюся в образцах арктической почвы. С помощью секвенирования ДНК можно выявить и идентифицировать различные виды микроорганизмов, а также изучать их генетическое разнообразие и эволюционные связи. Метод помогает в понимании состава и структуры микробных сообществ в арктической почве.

2. Метагеномика представляет собой анализ геномного материала, полученного из общей смеси ДНК или РНК из почвенных образцов. Этот метод позволяет изучать генетический потенциал всего сообщества микроорганизмов, включая функциональные гены и биохимические пути. Метагеномика позволяет исследовать функциональные возможности и вклад микроорганизмов в почвенные процессы в арктической зоне.

3. ПЦР (Полимеразная цепная реакция) используется для амплификации и определения конкретных генов или генетических маркеров, которые могут быть связаны с определенными функциями микроорганизмов или процессами в почве. Этот метод позволяет идентифицировать и изучать наличие и распространение определенных микробных популяций или функций в арктической почве.

4. Метабаркодирование основано на анализе последовательности определенного гена или генетического маркера для идентификации и изучения разнообразия организмов в образцах арктической почвы. Этот метод позволяет выявлять различные таксоны микроорганизмов, включая

бактерии, грибы, археи и другие организмы, и изучать их распределение и динамику в почвенной экосистеме.

5. Изотопный анализ является молекулярным методом, который позволяет измерять изотопный состав элементов в почвенных образцах. Это позволяет определить и изучить цикл элементов, а также процессы и источники питания микроорганизмов и растений в арктической почве. Например, изотопный анализ углерода ($\delta^{13}\text{C}$) может дать информацию об источниках органического вещества и динамике его разложения.

Молекулярные методы анализа арктической почвы позволяют получить детальную информацию о генетическом разнообразии микроорганизмов, их функциональных возможностях и взаимодействиях в почвенной экосистеме. Они помогают лучше понять роль микроорганизмов в почвенных процессах, взаимодействие с окружающей средой и изменения, вызванные климатическими и антропогенными факторами. Эти методы являются важным инструментом для более глубокого изучения арктических почвенных экосистем и разработки стратегий их охраны и устойчивого использования [35].

3.5.5 Геохимические методы анализа

Геохимические методы анализа почв в Арктике предоставляют информацию о химическом составе почвы, ее минералогическом составе и позволяют оценить различные химические и физико-химические свойства почвенных образцов. Эти методы играют важную роль в изучении почвенных процессов, оценке питательного состояния почвы, изучении влияния антропогенных факторов на почвенные экосистемы и оценке их устойчивости [38].

Рассмотрим некоторые геохимические методы анализа почв в Арктике:

1. Химический анализ элементного состава. Этот метод позволяет определить содержание различных элементов в почве, таких как азот,

фосфор, калий, кальций, магний и другие макро- и микроэлементы. Измерение содержания элементов помогает оценить питательное состояние почвы и ее способность обеспечивать необходимые питательные вещества для растений и микроорганизмов.

2. Анализ минерального состава. Геохимические методы позволяют определить минеральный состав почвы, то есть состав и содержание различных минералов. Это помогает в понимании геологического происхождения почвы, ее формирования и характеристик.

3. Определение кислотности и реакции почвы. Геохимические методы позволяют измерить кислотность (pH) и реакцию почвы. Эти параметры влияют на доступность питательных веществ для растений и микроорганизмов, а также на химические и биологические процессы в почвенной экосистеме.

4. Определение содержания органического вещества. Геохимические методы позволяют оценить содержание органического вещества в почве. Это важный параметр, который связан с почвенными свойствами, биологической активностью и питательным состоянием почвы. Анализ содержания органического вещества позволяет оценить уровень органического обмена в почве, ее плодородие и углеродное хранение.

5. Определение токсичности и загрязнений. Геохимические методы могут использоваться для оценки содержания и распространения токсичных веществ и загрязнений в арктической почве. Это важно для изучения воздействия антропогенных факторов, таких как промышленная деятельность, нефтяные разливы или другие загрязнения, на почвенные экосистемы в Арктике.

Геохимические методы анализа почв в Арктике помогают понять химические и физико-химические свойства почвы, их взаимодействие с окружающей средой и процессы, происходящие в почвенной экосистеме. Эти методы играют важную роль в оценке здоровья и устойчивости почвенных

систем, а также в разработке стратегий устойчивого управления и охраны арктических почв [35].

3.5.6 Физические методы анализа

Физические методы анализа почв в Арктике используются для изучения физических свойств и структуры почвы. Они помогают понять физические процессы, происходящие в почвенной экосистеме, такие как влагоудержание, воздухообмен, теплопроводность и механические свойства почвы. Физические методы анализа, применяемые в арктических почвах, включают в себя:

1. Определение текстуры почвы. Текстура почвы определяет соотношение песчаных, супесчаных, супесчано-глинистых и глинистых частиц. Определение текстуры почвы проводится с помощью ситового анализа, при котором образец почвы просеивается через набор сит различного размера. Затем определяется процентное содержание каждой фракции, что позволяет классифицировать почву по текстуре.

2. Определение плотности почвы. Плотность почвы отражает степень ее плотности и компактности. Методы определения плотности почвы включают использование цилиндра или кольца для получения образца по известному объему. Затем измеряется масса образца и рассчитывается плотность почвы, выраженная в г/см^3 или кг/м^3 . Плотность почвы может быть связана с водоудержанием и доступностью воды и воздуха для растений и микроорганизмов.

3. Определение водоудержания. Водоудержание почвы определяет ее способность удерживать и распределять воду. Методы определения водоудержания включают гравиметрический анализ, при котором изначальный вес образца почвы сравнивается с его весом после удаления избыточной влаги. Также используются методы центрифугирования и использования водного напряжения для изучения водного потенциала почвы.

4. Определение проницаемости почвы. Проницаемость почвы отражает ее способность пропускать воду и воздух. Методы определения проницаемости включают использование инфильтрометра или пластмассовых цилиндров, которые устанавливаются на поверхность почвы и заполняются водой. Затем измеряется скорость проникновения воды через почву. Это позволяет оценить способность почвы к дренажу, водоудержанию и потенциальным проблемам, связанным с избыточной влагой или засухой.

5. Анализ структуры почвы. Структура почвы отражает ее организацию, агрегированность и пористость. Методы анализа структуры включают визуальные наблюдения и оценку макроагрегатов (крупных структурных единиц почвы), измерение стабильности агрегатов и определение размера пор. Анализ структуры почвы позволяет оценить ее способность удерживать воду и воздух, а также проникание корней растений.

6. Методы теплопроводности. Измерение теплопроводности почвы позволяет оценить ее способность передавать тепло. Это важно для изучения теплового баланса почвы и понимания ее роли в климатических процессах. Методы включают использование тепловых зондов или теплового потока для измерения теплопроводности почвы.

Физические методы анализа почв в Арктике помогают понять ее физические свойства, влияние климатических условий на почвенные процессы и способность почвы поддерживать растительную и микробиологическую жизнь. Эти методы помогают улучшить понимание арктических почвенных экосистем и разработать стратегии устойчивого использования и охраны почвенных ресурсов [35].

3.5.7 Дистанционное зондирование и ГИС

Дистанционное зондирование и географические информационные системы (ГИС) являются мощными инструментами для изучения почв в

Арктике. Они позволяют получить широкомасштабные и детализированные данные о почвенных характеристиках и их пространственном распределении.

Дистанционное зондирование включает использование спутниковых и авиационных снимков, а также радиолокационных данных для получения информации о почвенных свойствах. С помощью спутниковых снимков можно получить информацию о почвенном покрове, типах почв, изменениях в почвенном покрове и распределении растительности [30]. Авиационные снимки и радиолокационные данные позволяют оценить микротопографию почвы, включая ее текстуру, влажность, глубину замерзания и другие параметры.

ГИС представляет собой инструмент, который интегрирует пространственные данные и атрибутивную информацию о почвенных характеристиках. С помощью ГИС можно создать цифровую карту почвенного покрова, которая объединяет информацию о типах почв, их распределении, химических и физических свойствах. ГИС также позволяет проводить анализы и моделирование, исследовать взаимодействие почв с другими компонентами экосистемы и прогнозировать изменения в почвенных ресурсах под влиянием климатических и антропогенных факторов.

Методы дистанционного зондирования и ГИС в изучении почв в Арктике имеют целый ряд преимуществ.

Дистанционное зондирование позволяет получить данные о почвенных характеристиках на больших территориях, что особенно важно в пространственно-гетерогенной арктической зоне. Это позволяет охватить большую площадь исследования [30].

ГИС методы имеют высокую пространственную разрешающую способность. Спутниковые снимки и данные радиолокации обладают высоким разрешением, что позволяет выявлять детали в почвенном покрове и его изменения.

Дистанционное зондирование и ГИС обеспечивают возможность мониторинга почвенных изменений во времени. С помощью периодического сбора данных можно отслеживать динамику почвенных свойств, изменения в почвенном покрове и реагирование почв на климатические и антропогенные факторы. Это позволяет оценить долгосрочные тенденции и прогнозировать возможные изменения в арктических почвах.

Интеграция различных типов данных ГИС позволяет объединить данные дистанционного зондирования с другими географическими и атрибутивными данными, такими как климатические данные, данные о растительности и геологическая информация. Это позволяет проводить комплексный анализ и понимать взаимосвязи между почвенными характеристиками и другими факторами [30].

Использование дистанционного зондирования и ГИС позволяет оптимизировать использование почвенных ресурсов в арктической зоне. Они помогают принимать информированные решения о землепользовании, планировании сельскохозяйственных деятельности, строительстве инфраструктуры и охране природы.

Дистанционное зондирование и ГИС являются эффективными инструментами для изучения почв в Арктике. Они предоставляют не только информацию о текущем состоянии почв, но и позволяют анализировать долгосрочные изменения и прогнозировать будущие тенденции. Эти методы помогают лучше понять почвенные экосистемы Арктики, их уязвимость и необходимость охраны.

3.5.8 Методы взятия образцов и обработки

Методы взятия образцов и обработки почв в Арктике играют важную роль в получении надежных данных о почвенных свойствах и их интерпретации. В связи с особенностями арктической зоны, такими как низкие температуры, малая толщина почвенного покрова и наличие

замерзшего грунта, эти методы требуют специфического подхода. Ниже представлены некоторые распространенные методы взятия образцов и обработки почв в арктической зоне [39].

Береговые пробы. Для изучения почв в арктической морской окружающей среде используются береговые пробы. Они собираются на берегу моря или океана с помощью специальных инструментов, таких как буры или грунтовые колонки. Береговые пробы позволяют изучать почву, находящуюся на прибрежных участках и ее связь с морской экосистемой.

Пробы из внутренних участков. Для изучения почв внутри суши арктической зоны используются методы взятия проб. Пробы могут быть взяты с помощью грунтовых колонок, буровых или простых лопат, в зависимости от требуемой глубины и типа почвы. В случае наличия замерзшего грунта, могут применяться специализированные инструменты для пробивания и взятия образцов [35].

Монолитные пробы. В случае изучения глубокого замерзшего грунта или при поиске информации о вертикальном профиле почвы, используются монолитные пробы. Это большие блоки грунта, которые извлекаются из земли как целые, чтобы сохранить структуру и вертикальное распределение почвенных горизонтов. Монолиты могут быть разрезаны на отдельные секции для дальнейшего анализа и изучения.

Обработка и хранение почвенных образцов в арктической зоне требует особых мер предосторожности, чтобы сохранить их природные свойства и минимизировать потерю информации. Образцы должны быть надлежащим образом упакованы и защищены от внешних воздействий, таких как высокие или низкие температуры, воздействие света или влаги. Для хранения образцов почвы в арктической зоне рекомендуется использовать специальные контейнеры или упаковки, которые обеспечивают изоляцию и сохранение структуры образцов.

Обработка образцов в лаборатории включает их подготовку для проведения различных анализов. Это может включать измельчение и

просеивание образцов для получения однородного материала, извлечение органического вещества или минералов, подготовку проб для химического анализа и т.д.

Важно отметить, что при обработке и анализе почвенных образцов в арктической зоне необходимо соблюдать меры предосторожности и этические стандарты, особенно при работе в уязвимых экосистемах [39].

ГЛАВА 4 Оценка загрязненности почв Красноярского края

4.1 Экологическое состояние почвенных ресурсов Красноярского края

Территория Красноярского края имеет вид меридионально ориентированной полосы длиной 3000 км и шириной 1250 км в северной части и 650 км в южной, которая включает степи и лесостепи, тайгу и лесотундру, тундру и арктические пустыни. Земельные ресурсы Красноярского края составляют 236,6 млн. га (13,7 % территории России). В состав края входят 44 муниципальных района, 15 городских округов краевого подчинения, 4 закрытых административно-территориальных образования (города Железногорск и Зеленогорск, поселки Кедровый и Солнечный), 49 городов районного значения и поселков городского типа, 1632 сельских поселения [20]. Земельный фонд края представлен в виде диаграммы на рисунке 3.

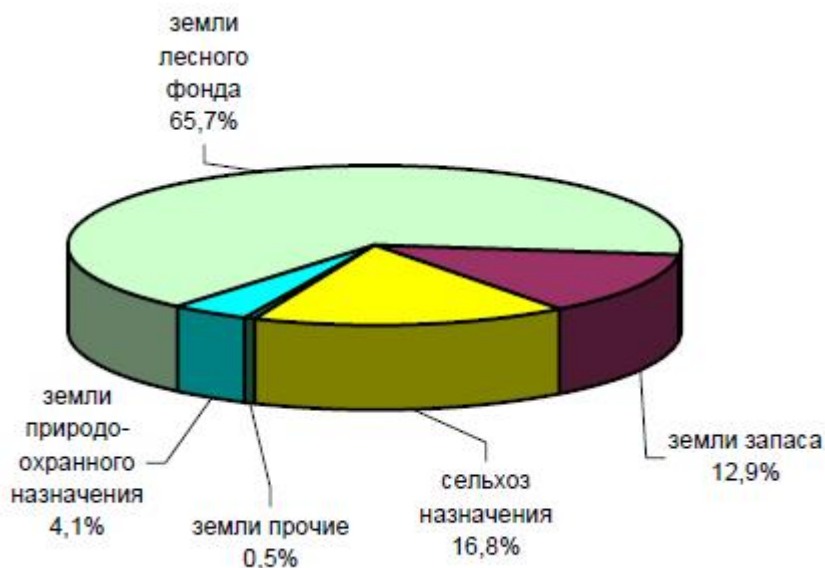


Рисунок 3 – Структура земельного фонда края по категориям земель на 01.01.2021 г. [13].

В Красноярском крае загрязнение почвы остается стабильно высоким, а показатели хуже, чем в среднем по России. Причем для этих территорий

санитарно-химический показатель ухудшается, а показатели паразитарного загрязнения почв остаются удовлетворительными. Почва засолена, заболочена, насыщена кислотами и еще множество вредных факторов можно перечислить. Общая площадь засоленных, солонцеватых и солонцовых земель составляет 74 тыс. га (1,65 % сельхозугодий). Площадь переувлажненных 367 тыс. га (8,19 % сельхозугодий), а заболоченных 228,5 тыс. га (5,1 % сельхозугодий). Около 3 млн. га почвы в крае имеют кислую реакцию, из них 1,3 млн. га (26 %) сельхозугодий (рис. 2), пашни – 0,9 млн. га, что составляет 28 % от всей пашни края, а работы по известкованию прекращены. Засоленных почв – 45,7 тыс. га, из них сельхозугодий – 31,9 тыс. га, в т.ч. пашни – 6,5 тыс. га. Заболоченных почв 228 тыс. га, из них сельхозугодий 26 тыс. га [13]. Наибольшие площади кислых почв расположены в Шарыповском, Идринском, Балахтинском и Ермаковском районах. В южных районах края засоление и осолонцевание земель является незначительным.

В крае идет также загрязнение почвенного покрова тяжелыми металлами, такими как свинец, кадмий, цинк, фтором и др. вблизи Красноярска, Ачинска, Норильска, Дивногорска, Зеленогорска, а также в Шарыповском и Ужурском районах, где имеются техногенные выбросы. Загрязнение и последующая деструктуризация почв вызваны либо локальным влиянием источника загрязнения, либо переносом токсических веществ в атмосфере. В последующем в почве кумулируются химические загрязнения, сохраняют жизнеспособность патогенная микрофлора и яйца гельминтов, и она становится источником вторичного загрязнения подземных вод, атмосферного воздуха, сельскохозяйственной продукции. Так, в г. Красноярске основной вклад в суммарное загрязнение почвы вносят мышьяк, фтор и бенз(а)пирен – 99 %. В г. Норильске отмечено повышенное содержание никеля, меди, свинца, цинка и кобальта. Почва промышленных зон г. Ачинска имеет превышение ПДК по меди (в 9 раз), цинку (в 4 раза), никелю (в 8 раз) [13].

Нарушение почвенного покрова, тоже влияющий фактор. Выполнение работ с нарушением почвенного покрова проводили 244 хозяйствующих объекта на территории 39 районов и 7 городов края.

4.2 Сбор данных

4.2.1 Подготовительный период

Целью подготовительного периода являлось ознакомление со всеми материалами, характеризующими факторы почвообразования Красноярского края, в которые включены климат, растительность, рельеф, материнские породы и хозяйственную деятельность. На основе имеющихся материалов определялась возможность отбора почвенных образцов и подсчитывался в соответствии с нормами объем работ.

4.2.2 Рекогносцировочное обследование

Предварительно на топографической карте производилось выделение районов междуречий и речных долин и намечается сеть маршрутов с пересечением всех основных элементов рельефа (водораздела, склонов, террас, поймы, эрозионно-опасных участков).

В течение экспедиции вдоль Енисея были отобраны почвенные образцы из крупных поселений Красноярского края

1. Дудинка
2. Игарка
3. Туруханск
4. Красноярск

Целью исследования была оценка экологического состояния почв городов Арктической и субарктической зоны Красноярского края.

Таблица 2. Краткая характеристика исследуемых населенных пунктов Красноярского края

№	Город	Краткая характеристика
1	Дудинка	(нен. Тут'ын) — город районного подчинения в Красноярском крае России, административный центр с особым статусом Таймырского Долгано-Ненецкого района.
2	Игарка	город в Туруханском районе Красноярского края России. Образует муниципальное образование со статусом городского поселения
3	Туруханск	Село, административно-территориальная единица и муниципальное образование в северо-западной части Красноярского края России. Относится к районам Крайнего Севера.
4	Красноярск	Крупнейший город России, экономический, образовательный и культурный центр Восточной Сибири, административный центр Красноярского края, центр Восточно-Сибирского экономического района. Наряду с Новосибирском - претендует на статус столицы Сибири. Самый восточный город-миллионер в России.

В ходе работы было изучено 20 почвенных проб, отобранных в различных районах вышеуказанных населенных пунктов. Пробы отбирали с глубин 0–20 см, в 50 метрах от автомобильных дорог. В ходе лабораторных исследований определяли содержание тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Fe, Ni, Zn, Co и Cr), мышьяка (As) и углеводородов (УВ) в отобранных пробах.

насыпными грунтами разного состава – карбонатным щебнем, торфокомпостом, песками и суглинками.

В целом почвенный покров изученных районов застройки населенных пунктов отличался глубокой нарушенностью, массовым включением твердых материалов.

В целях усреднения результатов, а также исключения погрешностей, пробы отбирались с площадки со стороной 5-10 м. В отдельных случаях антропогенно-ландшафтные условия местности ставили необходимым условием отбор почвенного материала с площадок с большей площадью.

4.2.3 Отбор и методика изучения почвенных образцов

Отбор почвенных образцов производился по ГОСТ Р 53123- 2008 (ИСО 10381-5:2005). Вышеуказанный государственный стандарт применяется для определения уровня загрязнения почв и оценке риска её использования для различных хозяйственных нужд и разработке рекомендаций по выбору способа рекультивации или применения почвы.

Сам метод заключался в отборе комбинированного почвенного образца массой в 1кг с почвенных горизонтов 0-0,2 метра с учетных площадок с верхних горизонтов методом конверта. Почвенные образцы отбирали с участков, находящихся на расстоянии минимум 50 м от ближайших автомобильных дорог [28].

Следующий этап за отбором образцов почвы включал в себя просушку образца естественным путём в хорошо вентилируемом помещении. Для этого образец было необходимо равномерно распределить на чистой бумаге или кальке и оставить до полного высыхания, без дополнительной термической обработки во избежание потери летучих органических соединений. После высыхания почва перемалывалась в ступке и хранилась в плотно закрывающейся таре.

Определение концентраций тяжёлых металлов выполнялись по методике М-МВИ 80-2008 для атомно-абсорбирующих спектрометров. В качестве определяющего прибора использовался пламенный атомно-абсорбирующий спектрометр «Квант-2А» с ртутно-гидридной приставкой в комплекте.

В дальнейшем полученные значения по тяжелым металлам сопоставляли с имеющимися ориентировочно-допустимыми концентрациями (ОДК) и предельно-допустимыми концентрациями (ПДК), указанными в ГН 2.1.7.2511–09 [11], ГН 2.1.7.2041–06 [10] и СанПиН 42-128-4433–87 [43, 37].

Показатель суммарного загрязнения (Z_c) рассчитывался по стандартной методике (МУ 2.1.7.730-99). Для эколого-геохимической оценки состояния почв и грунтов используется коэффициент концентрации (K_{ci}) тяжелого металла, отобранного в определенной точке относительно фона, характеризующий интенсивность техногенной аномалии. Коэффициент концентрации равен отношению содержания элемента в исследуемом объекте к его фоновому содержанию:

$$K_{ci} = \frac{C_i}{C_{\phi}}, \text{ где}$$

C_i — фактическое содержание i -го химического элемента в почвах и грунтах, мг/кг;

$C_{\phi i}$ — фоновое содержание i -го химического элемента в почвах и грунтах, мг/кг.

Таблица 3 – Фоновые содержания валовых форм тяжелых металлов и мышьяка в почвах (мг/кг)

Горизонт	Mn	Zn	Cr	Ni	Pb	Cu	Co	Cd	Hg
A	49,9	26,7	1,2	8,9	5,7	16	1,6	0,12	0,09
B	12	7,6	0,8	3	1,9	3	1,1	0,1	0,03

Для комплексного анализа загрязнения рассчитывается суммарный показатель загрязнения (Z_c), характеризующий эффект воздействия группы

элементов. Суммарный показатель загрязнения равен сумме коэффициентов концентрации химических элементов.

$$Z_c = K_{C_i} + \dots + K_{C_n} - (n - 1), \text{ где}$$

n — количество учитываемых химических элементов;

K_{C_i} — коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения, превышающий единицу.

После расчёта Z_c его значения сравниваются с установленными категориями загрязнения.

Таблица 4 – Установленные категории загрязнения

Категория загрязнения почв	Величина Z_c
Допустимая	Менее 16
Умеренно опасная	16-32
Опасная	32-128
Чрезвычайно опасная	более 128

При расчёте этого показателя важно знать, что необходимо учитывать только те элементы, где присутствуют превышения фоновых значений концентраций. Если включать в расчётную формулу все элементы, то это может привести к серьёзным неточностям и даже к отрицательным значениям этого показателя, чего не может быть на практике.

Образцы почвы отбирали летом (июль) 2022 года во время экспедиции СПбГУ от Дикси до Красноярска на теплоходе «Максим Горький». В качестве объектов исследования были выбраны населенные пункты, расположенные на Енисее. В данных насланных пунктах теплоход имел длительные стоянки (таблица 5).

Таблица 5 – Основные места отбора почвенных образцов в населенных пунктах Красноярского края и дата отбора образцов

№	№ образца	Населенный пункт	Улица	Дата отбора
1	1	г. Дудинка	Ул. Горького, 8	05.07.2022
	2		Ул. Ленина, 10	05.07.2022
	3		Ул. Матросова, 11	05.07.2022
	4		Ул. Щорса, 11	05.07.2022
	5		Ул. Строителей, 3	05.07.2022
2	6	г. Игарка	Ручей Безымянный, 1-ый микрорайон	08.07.2023
	7		Игарская ул., 25	08.07.2023
	8		Ул. Горького, 17	08.07.2023
	9		Ул. К. Маркса, 10	08.07.2023
3	10	с. Туруханск	Ул. Спандаряна, 57	10.07.2023
	11		Ул. Кирова, 4	10.07.2023
	12		Ул. Дружбы Народов, 9	10.07.2023
4	13	г. Красноярск	ул. Минусинская, 14	16.07.2023
	14		ул. Чайковского, 7	16.07.2023
	15		ул. Сурикова, 54	16.07.2023
	16		ул. Матросова, 6	16.07.2023
	17		ул. Кутузова, 92	17.07.2023
	18		ул. Тельмана, 18	17.07.2023
	19		ул. Солнечная, 8	17.07.2023
	20		ул. Красномосковская, 32	17.07.2023

На рисунках 5-8 представлены основные точки отбора почвенных образцов в исследуемых населенных пунктах.



Рисунок 5 – Схема отбора почвенных образцов в г. Дудинка



Рисунок 6 – Схема отбора почвенных образцов в г. Игарка

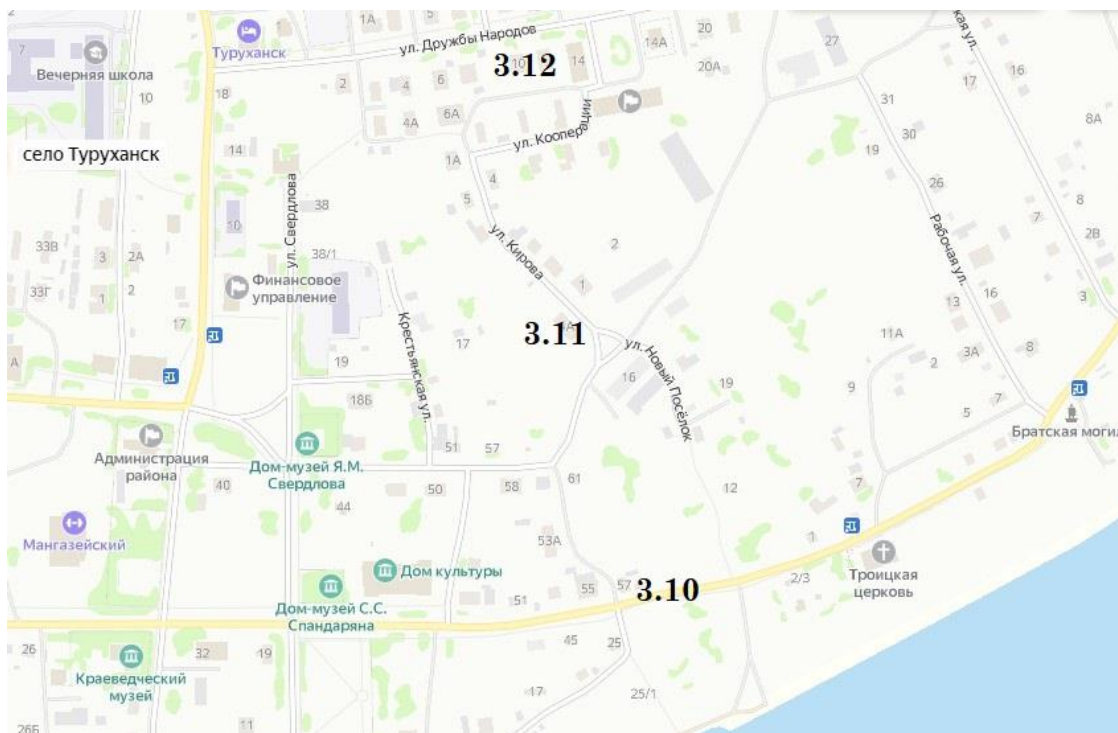


Рисунок 7 – Схема отбора почвенных образцов в с. Туруханск



Рисунок 8 – Схема точек отбора почвенных образцов, г. Красноярск

Для подтверждения данных о загрязненности почв тяжелыми металлами, параллельно было проведено биотестирование, в трехкратной повторности для каждого анализа пробы. Эксперимент проводился в лаборатории Агрофизического института, в весенний период 2023 г. (дата

заложения 12.03.2023). Продолжительность эксперимента составила 14 суток.

В каждую пробу семян помещали этикетку с указанием регистрационного номера средней пробы, номера проращиваемой пробы (повторности), дата учета всхожести.

Среднюю пробу почвы растирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с величиной отверстий в 1 мм. Для приготовления водной вытяжки брали навеску воздушно-сухой почвы в 20 г и помещали в коническую колбу на 250 см³. В колбу наливали 100 мл дистиллированной воды (соотношение почвы и воды 1:5), лишенной CO₂ (30 мин. кипячением). Содержимое колбы размешивали с помощью магнитной мешалки 5 мин.

Затем водную вытяжку отстаивали 5 мин и фильтровали через беззольный бумажный фильтр в небольшой химический стакан.

В чашки Петри помещали фильтровальную бумагу. На поверхность фильтров укладываются по 30 семян тест-растений. Расстояние между соседними семенами - одинаковое.

Проращивание всех семян проводили в одинаковых условиях по всем факторам. Содержимое чашек Петри увлажняли водной вытяжкой исследуемой почвы. Одна чашка служила в качестве контроля по отношению к остальным, фильтровальную бумагу в ней увлажняли дистиллированной водой. В течение 14 дней наблюдали за прорастанием семян, поддерживая влажность на одном уровне.

Биомасса растений - наиболее чувствительный параметр для выявления стрессовых воздействий среды, но по большей части неспецифичный, при выполнении данного исследования он применялся для биотестирования, так как позволяет непосредственно определить снижение продуктивности растения

В качестве тест-растений были использованы:

кресс-салат (*Lepidium sativum* L.), съедобное однолетнее травянистое растение семейства Капустные, или Крестоцветные. Корень тонкий,

стержневой. Растение в молодом возрасте образует розетку листьев высотой 15—17 см, диаметром 18—20 см, сорт Весенний – двудольное растение;

рапс (*Brássica napus* L.), вид травянистых растений рода Капуста семейства Капустные или Крестоцветные (Brassicaceae). Важная масличная культура; сорт Надежный 92 – двудольное растение;

Для расчета статистических показателей (среднее значение, минимум, максимум, стандартное отклонение, стандартная ошибка, коэффициент вариации) пользовались программой Excel.

4.3 Полученные результаты.

В сводной таблице 6 представлено содержание подвижных тяжелых металлов в почвенных образцах исследуемых населенных пунктов Дудинка, Игарка, Туруханск и Красноярск.

Таблица 6 - Содержание подвижных форм тяжелых металлов в урбаногемах различных населенных пунктов Красноярского края

Населенный пункт	№	Место отбора	Содержание загрязняющих веществ, мг/кг							
			Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Mn	Co	Cr
г. Дудинка	1	Ул. Горького, 8	8,31	0,21	4,04	19,47	12,42	136,18	4,32	4,31
	2	Ул. Ленина, 10	7,62	0,46	12,12	14,47	24,25	152,15	6,16	4,25
	3	Ул. Матросова, 11	12,34	1,02	8,43	15,31	23,59	107,37	7,47	5,68
	4	Ул. Щорса, 11	9,31	0,81	4,8	12,1	16,35	157,3	5,54	4,88
	5	Ул. Строителей, 3	9,20	0,77	6,35	12,34	11,15	118,65	4,87	3,68
Среднее			9,36	0,69	7,15	14,74	17,55	134,33	5,67	4,56
Стандартное отклонение			1,61	0,34	2,90	2,67	5,48	19,09	1,09	0,68
г. Игарка	6	Ручей Безымянный, 1-ый микрорайон	7,24	0,19	2,97	18,40	11,35	135,11	3,25	3,24
	7	Игарская ул., 25	6,55	0,44	11,05	13,40	23,18	151,08	5,09	3,18
	8	Ул. Горького, 17	11,27	0,39	7,36	14,24	22,52	106,30	6,40	4,61
	9	Ул. К. Маркса, 10	8,24	0,79	3,73	11,03	15,28	156,23	4,47	3,81
Среднее			8,33	0,46	6,28	14,27	18,09	137,18	4,81	3,71
Стандартное отклонение			1,80	0,22	3,22	2,66	4,97	19,45	1,14	0,57
с. Туруханск	10	Ул. Спандаряна, 57	8,33	0,66	6,28	14,27	18,09	137,18	4,81	3,71
	11	Ул. Кирова, 4	14,53	0,23	10,24	13,64	29,38	246,95	6,76	4,31
	12	Ул. Дружбы Народов, 9	10,43	0,34	8,96	11,95	20,73	182,07	4,78	5,01
Среднее			11,09	0,41	8,49	13,29	22,73	188,73	5,45	4,34
Стандартное отклонение			3,15	0,22	2,02	1,20	5,90	55,19	1,14	0,65
г. Красноярск	13	ул. Минусинская, 14	10,53	0,07	12,71	15,26	18,92	247,8	7,63	5,42
	14	ул. Чайковского, 7	19,9	0,24	12,07	13,86	33,16	243	6,85	4,61
	15	ул. Сурикова, 54	9,15	0,21	8,41	13,41	25,59	250,9	6,67	4,01
	16	ул. Матросова, 6	63,36	1,41	26,89	13,61	46,3	250,7	6,58	5,25
	17	ул. Кутузова, 92	23,76	0,21	9,04	14,47	19,72	253,2	7,32	5,14
	18	ул. Тельмана, 18	46,61	0,85	22,92	14,38	47,67	236,8	6,86	7,88
	19	ул. Солнечная, 8	9,08	0,15	8,82	8,18	26,55	171,1	3,47	2,91
	20	ул. Красномосковская, 32	11,09	0,26	9,81	15,71	15,56	207,7	5,34	4,36
Среднее			24,19	0,43	13,8	13,61	29,18	232,65	6,34	4,95
Стандартное отклонение			20,24	0,46	7,08	2,33	12,25	28,90	1,34	1,44
ПДК/ОДК*			6	1	3	4	23	140	5	6

Санитарно-гигиеническим критерием качества окружающей среды служит предельно допустимая концентрация (ПДК) химических веществ в объектах окружающей среды. ПДК соответствует максимальному содержанию химического вещества в природных объектах, которое не вызывает негативного (прямого или косвенного) влияния на здоровье человека (включая отдаленные последствия).

Как видно из представленной таблицы, изучаемые почвы в различных населенных пунктах Красноярского края существенно различались по концентрации тяжелых металлов в исследуемых урбаногемах.

Среди приоритетных металлов для всех изучаемых населенных пунктов характерна следующая убывающая тенденция по их содержанию в верхних почвенных горизонтах: марганец > цинк > никель > свинец > медь > кобальт > хром > кадмий.

Особое внимание в работе было уделено свинцу, который относится к группе тяжелых металлов 1-го класса экологической опасности, способных вызывать у человека и животных различные токсикозы и канцерогенные наследственные мутации. Исходя из анализа среднего содержания свинца в почвах и их сравнения с имеющимися ПДК, установлено, что максимальное его количество подвижной формы характерно для почвенных образцов города Красноярска, которые превосходили соответствующие количества в городах Дудинка, Игарка и села Туруханск в среднем в 2.6, 2.9 и 2.2 раза, соответственно.

При этом все изучаемые места города Красноярска отличались повышенным количеством данного тяжелого металла по сравнению с ПДК. Наивысшие количества Pb, а следовательно, и наиболее загрязненные районы были установлены для образцов 16 и 18, которые превышали ПДК по свинцу в 10 и 9, что связано главным образом с воздействием автотранспорта.

Наименьшее содержание свинца из исследуемых урбаногемов было определено в почвенных образцах города Игарка, которое варьировало от 6,5

до 11,7 мг/кг почвы. Максимальное количество свинца в данном населенном пункте было определено на ул. Горького, которое превышало ПДК в 1.8 раза.

Другой металл, также относящийся к наиболее токсичным для всех живых организмов, считается кадмий. Загрязнение кадмием представляет угрозу вследствие его высокой миграционной способности в почве. В Красноярском крае кадмий может попадать в почву при сжигании и переработке материалов. Сжигание мазута и дизельного топлива является дополнительным источником кадмиевого загрязнения.

Результаты исследования показали, что в городе Игарка и селе Туруханск данные по подвижной форме металла не превышали ПДК, установленные для кадмия. В городе Дудинка установлено незначительное превышение в точке 3, которое составило 1,02 мг/кг. В то время как в Красноярске также наблюдалось незначительное превышение в точке 16 (улица Матросова).

Медь и никель относятся к химическим элементам энергичной миграции в кислой среде и сорбируются алюмосиликатами и гидроксидами железа и марганца, характерными почв края и сконцентрированными преимущественно в верхней части профиля почвы. Они относятся к тяжелым металлам 2 класса опасности. Как видно из данных таблицы, данные ТМ существенно превышали ПДК почвы во всех изучаемых городах, в среднем в 3-4 раза. Максимальное их содержание также было характерно для столицы края. Известно, что недостаток данных металлов в почвах отрицательно влияет на синтез белков, жиров и витаминов в растениях, в тоже время ее избыточные концентрации приводят к изменению активно функционирующих в почве микробных сообществ, структуры и состава комплексов почвенных микроорганизмов, что проявляется в снижении их видового разнообразия [28]. Поэтому необходим мониторинг содержания меди и никеля в почве и растениях и поиски путей нейтрализации влияния избыточных концентраций.

Среднее содержание цинка в изучаемых почвенных образцах было несколько ниже или слегка превышало ПДК, тогда как марганца – существенно превосходило. Содержание марганца в образцах почв варьирует в широком диапазоне, что присуще территории с повсеместным развитием процессов подзолообразования и заболачивания. Отмечено увеличение концентрации подвижного марганца в образцах урбаноземов при продвижении с севера на юг. Максимальное содержание данного металла было установлено в почвенных образцах Красноярска, которое варьировало от 170 до 256 мг/кг.

Для кобальта, как и цинка, характерны области повышенных значений, приуроченных к крупным промышленным городам. Результаты исследований показали, что среднее содержание данного металла несущественно превышало ПДК, и чаще всего высокие показатели обнаруживались рядом с высокозагруженными автомобильным транспортом проспектами. При этом максимальные концентрации отмечены в столице края – Красноярске, где варьировали от 4 до 8 мг/кг.

Хром является тяжёлым металлом с высоким содержанием токсических соединений. Такое загрязнение почвы характеризует регион как неблагополучный. Биосфера, загрязнённая техногенными формами хрома, может измениться в скором времени. Однако во всех изученных населенных пунктах данный металл не превышал предельно допустимые концентрации.

Для каждой пробы почв были рассчитаны индексы суммарного загрязнения почв (Z_c). При этом стоит отметить, что суммарный индекс загрязнения был рассчитан с использованием арифметической суммы отношения фактического содержания к фоновому. При условии учета средних геометрических значений коэффициентов концентрации сильно снижается суммарная загрязненность по сравнению с обычной формулой, которая основана на средних арифметических значениях коэффициентов концентрации (в случае большого разброса коэффициентов концентрации).

В таблице 7 представлены индексы суммарного загрязнения почв, которые позволили рассчитать суммарный коэффициент загрязнения. В качестве фоновых почв были учтены особенности регионального фонового содержания многих элементов, а также выявлены закономерности изменения их количества в зависимости от гранулометрического состава, гумусированности почв, реакции среды, содержания элементов в почвообразующих породах и других факторов. Данные по фоновым количествам в почвах Красноярского края представлены в таблице 5 (глава 4.2.3).

Таблица 7 - Индексы суммарного загрязнения почв (Kci)

Населенный пункт	№	Место отбора	Kci							
			Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Mn	Co	Cr
г. Дудинка	1	Ул. Горького, 8	2,19	1,91	0,43	3,27	0,72	4,40	3,20	4,31
	2	Ул. Ленина, 10	2,01	4,18	1,28	2,43	1,41	4,92	4,56	4,25
	3	Ул. Матросова, 11	3,25	11,00	0,89	2,57	1,38	3,47	5,53	5,68
	4	Ул. Щорса, 11	4,26	7,36	0,51	2,03	0,95	5,08	4,10	4,88
	5	Ул. Строителей, 3	2,42	7,02	0,67	2,07	0,65	3,83	3,61	3,68
Среднее			2,82	6,30	0,75	2,48	1,02	4,34	4,20	4,56
Стандартное отклонение			0,83	3,08	0,31	0,45	0,32	0,62	0,81	0,68
г. Игарка	6	Ручей Безымянный, 1-ый микрорайон	1,91	1,75	0,31	3,09	0,66	4,37	2,41	3,24
	7	Игарская ул., 25	2,71	4,03	1,16	2,25	1,35	4,88	3,77	3,18
	8	Ул. Горького, 17	4,66	10,85	0,78	2,39	1,31	3,43	4,74	4,61
	9	Ул. К. Маркса, 10	4,32	7,21	0,39	1,85	0,89	5,05	3,31	3,81
Среднее			3,40	5,38	0,66	2,01	1,05	3,67	3,56	3,11
Стандартное отклонение			1,13	3,27	0,34	0,88	0,29	1,63	0,84	1,32
с. Туруханск	10	Ул. Спандаряна, 57	2,19	5,96	0,66	2,40	1,05	4,43	3,56	3,71
	11	Ул. Кирова, 4	3,36	2,05	1,08	2,29	1,71	7,98	5,01	4,31
	12	Ул. Дружбы Народов, 9	2,41	3,09	0,94	2,01	1,21	5,88	3,54	5,01
Среднее			2,65	3,70	0,89	2,23	1,33	6,10	4,04	4,34
Стандартное отклонение			0,62	1,65	0,21	0,16	0,34	1,46	0,84	0,53
г. Красноярск	13	ул. Минусинская, 14	2,77	0,64	1,34	2,56	1,10	8,01	5,65	5,42
	14	ул. Чайковского, 7	8,25	2,18	1,27	2,33	1,93	7,85	5,07	4,61
	15	ул. Сурикова, 54	3,80	1,91	0,89	2,25	1,49	8,11	4,94	4,01
	16	ул. Матросова, 6	16,67	12,82	2,83	2,29	2,70	8,10	4,87	5,25
	17	ул. Кутузова, 92	8,57	1,91	0,95	2,43	1,15	8,18	5,42	5,14
	18	ул. Тельмана, 18	16,82	7,73	2,41	2,42	2,78	7,65	5,08	7,88
	19	ул. Солнечная, 8	2,39	1,36	0,93	1,37	1,55	5,53	2,57	2,91

	20	ул. Красномосковская, 32	0,67	2,36	1,03	2,64	0,91	6,71	3,96	4,36
Среднее			7,49	3,86	1,46	2,29	1,70	7,52	4,70	4,95
Стандартное отклонение			6,34	3,94	0,75	0,37	0,71	0,87	0,99	1,44

В таблице 8 представлены категории загрязнения исследуемых населенных пунктов Красноярского края. Конечно, городские почвы значительно отличаются от природных почв, т.к. они преобразованы в результате строительства территории, с ухудшенным воздушным и водным режимом, нарушенной жизнедеятельностью почвенных организмов. В прямой зависимости друг от друга находится состояние здоровья городского населения и сохранение с поддержанием природных экологических свойств городских почв.

Таблица 8 – Категория загрязнения исследуемых населенных пунктов Красноярского края

№	Zс	Категория загрязнения	№	Zс	Категория загрязнения
г. Дудинка			г. Игарка		
1	13,4	Допустимая	6	10,7	Допустимая
2	18,0	Умеренно опасная	7	16,3	Умеренно опасная
3	25,0	Умеренно опасная	8	18,5	Умеренно опасная
4	22,2	Умеренно опасная	9	19,8	Умеренно опасная
5	17,0	Умеренно опасная			
ср	19,1	Умеренно опасная	ср	16,4	Умеренно опасная
с. Туруханск			г. Красноярск		
10	17,0	Умеренно опасная	13	20,5	Умеренно опасная
11	20,8	Умеренно опасная	14	26,5	Умеренно опасная
12	17,1	Умеренно опасная	15	20,4	Умеренно опасная
			16	48,5	Опасная
			17	26,8	Умеренно опасная
			18	45,8	Опасная
			19	11,6	Допустимая
			20	15,6	Допустимая
ср	18,3	Умеренно опасная	ср	27,0	Умеренно опасная

Суммарный показатель загрязнения (Z_c), позволяет вычислить геохимический (фоновый) уровень загрязнения и сравнить степень загрязнения почвенного покрова.

Как видно из представленных данных, только в двух из 4 населенных пунктов в некоторых образцах, отобранных с изучаемых территорий, были установлены допустимые уровни загрязнения. В Дудинке – в точке 1, а в Игарке – в точке 6. Эти точки ближе всего находились к Енисею, вполне возможно, некоторые подвижные формы металлов вымывались в реку.

В целом, для всех населенных пунктов характерна умеренно опасная категория загрязненности почв, что свидетельствует от относительно высоких концентраций ТМ в почвах, поэтому не сложно оценить их токсическое действие, оказывающее внешне малозаметное влияние на окружающую среду. Между тем, загрязнение именно такого рода, действуя длительное время, способно вызвать серьезные сдвиги в существующем в природе биологическом равновесии. Кроме того, в Красноярске, в точках 16 и 18 была установлена опасная категория загрязнения территории.

Таким образом, почвы исследуемых населенных пунктов имеют в целом средний уровень загрязнения, это свидетельствует о том, что антропогенная нагрузка достаточно высока, а городские почвы еще сохраняют способность самоочищаться. Кроме того, загрязнение почвы солями тяжелых металлов является актуальной проблемой, так как на территории края присутствуют химические, металлургические, нефтехимические и другие предприятия, являющиеся источниками загрязнения атмосферного воздуха и почвы.

4.4 Оценка фитотоксичности исследуемых почвенных проб

Растения в городской среде испытывают значительную антропогенную нагрузку, вызванную как интенсивным воздействием рекреации, так и загрязнением воздуха и почв. Не менее важное влияние на их

жизнеспособность оказывают природно-климатические условия, которые могут не только усиливать негативную роль антропогенных факторов, но и ослаблять ее, что особенно актуально для Арктических и Северных регионов.

Фитоиндикация – способ определения свойств природной среды или отдельных ее компонентов (почв, вод, атмосферы) с помощью растений. По наличию и состоянию совокупности растений можно прямо либо косвенно судить о свойствах среды, а также происходящих естественных и антропогенных изменениях.

Фитоиндикаторами являются отдельные растения и фитоценозы, особенности морфологии и физиологии растений, которые в силу тесной взаимосвязи с различными компонентами ландшафта указывают на характер, распределение, динамику условий окружающей среды.

Фитоиндикаторы чутко реагируют на изменение среды, и их использование позволяет достаточно быстро оценить степень загрязнения [23].

Таблица 9 – Критерии оценка уровня загрязнения почвы методом биоиндикации с применением биоиндикаторных тест-культур – кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и рапса (рапс (*Brassica napus* L.)

Показатель всхожести	Балл	Оценка загрязнения почвы
Всхожесть семян 90-100 %.	4	Загрязнение отсутствует
Всхожесть 60-90 %	3	Слабое загрязнение
Всхожесть 20-60 %	2	Среднее загрязнение
Всхожесть очень слабая. Меньше 20 %	1	Сильное загрязнение

Таблица 10 – Фитотоксичность почвенных проб (n=3)

Населенный пункт	№	Местоположение	Кресс-салат		Рапс	
			Всхожесть, %	Балл	Всхожесть, %	Балл
г. Дудинка	1	Ул. Горького, 8	82 ± 8	3	78 ± 12	3
	2	Ул. Ленина, 10	74 ± 14	3	70 ± 10	3
	3	Ул. Матросова, 11	65 ± 7	3	57 ± 6	2

	4	Ул. Щорса, 11	72 ± 11	3	68 ± 8	3
	5	Ул. Строителей, 3	85 ± 9	3	81 ± 12	3
г. Игарка	6	Ручей Безымянный, 1-ый микрорайон	74 ± 3	3	70 ± 12	3
	7	Игарская ул., 25	77 ± 4	3	73 ± 10	3
	8	Ул. Горького, 17	82 ± 16	3	78 ± 8	3
	9	Ул. К. Маркса, 10	71 ± 7	3	67 ± 7	3
с. Туруханск	10	Ул. Спандаряна, 57	88 ± 13	3	84 ± 11	3
	11	Ул. Кирова, 4	90 ± 16	4	86 ± 13	3
	12	Ул. Дружбы Народов, 9	76 ± 9	3	72 ± 9	3
г. Красноярск	13	ул. Минусинская, 14	70 ± 8	3	63 ± 8	3
	14	ул. Чайковского, 7	82 ± 14	3	85 ± 15	3
	15	ул. Сурикова, 54	72 ± 10	3	88 ± 13	3
	16	ул. Матросова, 6	57 ± 3	2	55 ± 6	2
	17	ул. Кутузова, 92	85 ± 11	3	74 ± 7	3
	18	ул. Тельмана, 18	53 ± 8	2	52 ± 6	2
	19	ул. Солнечная, 8	97 ± 17	4	81 ± 11	3
	20	ул. Красномосковская, 32	83 ± 14	3	75 ± 14	3

Сравнительная оценка тест-культур произвели на основе чувствительности показателей роста и массы растений, которые у кресс-салата варьировали в большей степени (от 53 до 97), чем у рапса (от 52 до 84).

Как видно из представленных данных только в пробах почв в городе Дудинка и города Красноярск) было отмечено среднее загрязнение почв, тогда как в Игарке и селе Туруханск отмечено в основном слабое загрязнение.

При этом, следует отметить, что установлена тесная корреляционная связь ($r = 86$ при $p < 0,05$) между загрязнением почв тяжелыми металлами и всхожестью исследуемых тест-культур.

Заключение

1. На территории Арктики распространены разнообразные почвы, строение и свойства которых определяют: отрицательные температуры в течение большей части года; наличие, как правило, неглубоко залегающих многолетнемёрзлых пород, активно участвующих в почвообразовательных процессах; относительно низкая величина опада, поступающего в почву.

2. Основные угрозы экологического характера для почв в Арктической зоне РФ связаны с: увеличением загрязнения и деградацией компонентов природной среды в условиях растущей антропогенной нагрузки, накопление отходов и глобальными климатическими изменениями и их влиянием на распространение вечной мерзлоты. Отмечается загрязнение воздуха и изменением среды обитания организмов из-за влияния добычи полезных ископаемых и транспорта. Экосистема страдает от выбросов и стоков промышленных предприятий и коммунального хозяйства; продуктов добычи и переработки углеводородного сырья (нефти, газа); тяжелых металлов и других отходов металлургического производства; отдельных токсических веществ (фенол, аммиак и другие); многочисленных загрязнителей с береговых военных баз; отходов судов.

3. Наблюдается глубокая трансформация свойств почв в пределах селитебных зон в результате перемешивания и создания новых минеральных слоев из пород разного гранулометрического состава, использования карбонатных материалов при строительстве, торфокомпоста при создании газонов, техногенного загрязнения, что современная городская почва обладает новым комплексом свойств, определяющих качество городской среды

4. Способность городской почвы выполнять функции по оптимизации окружающей среды зависит от ее свойств, уровня загрязненности. Среди приоритетных металлов изученных населенных пунктов характерна следующая убывающая тенденция по их содержанию в

верхних почвенных горизонтах: марганец > цинк > никель > свинец > медь > кобальт > хром > кадмий.

5. Для всех изученных населенных пунктов характерна умеренно опасная категория загрязненности почв, что свидетельствует от относительно невысоких концентраций ТМ в почвах, поэтому сложно оценить их токсическое действие, оказывающее внешне малозаметное влияние на окружающую среду. Между тем, загрязнение именно такого рода, действуя длительное время, способно вызвать серьёзные сдвиги в существующем в природе биологическом равновесии.

6. Оценка содержания ТМ является приоритетной в ряду мониторинга воздушной и почвенной сред. Опасность повышенного содержания ТМ в экосистеме обусловлена тем, что большинство металлов имеют высокую биологическую активность и в незначительных количествах способны вызывать токсический эффект у организмов. Также металлы не подвержены биодegradации, находясь в биогеохимическом цикле, они накапливаются и практически не выводятся из данного процесса.

7. Исследуемые территории по уровню загрязненности тяжелыми металлами расположились в следующий убывающий ряд: г. Красноярск > г. Дудинка > с. Туруханск > г. Игарка. В данном списке выделяется город Красноярск, как город миллионник, с большим количеством промышленных предприятий и автотранспорта. Некоторые ТЭЦ данного города продолжают отапливаться бурым углем, что приводит к увеличению содержания тяжелых металлов в окружающей среде.

8. В Красноярске, на ул. Матросова и на ул. Тельмана была установлена опасная категория загрязнения территории и выявлены превышения концентрации валовых форм свинца, цинка, кобальта.

9. Наиболее фитотоксичными оказались почвенные образцы, взятые с ул. Матросова и Тельмана в Красноярске и улице Щорса в Дудинке.

Данная магистерская диссертация предоставляет уникальные данные о загрязнении почв в арктических условиях, что имеет важное значение для разработки эффективных стратегий по управлению территории и принятии мер по охране окружающей среды в этом уникальном регионе в условиях увеличивающегося антропогенного воздействия. Данная работа позволяет оценить устойчивость арктических почв к различным видам загрязнений и формирует основу для разработки мер по их сохранению.

Практические рекомендации

Загрязнение почв тяжелыми металлами на сегодняшний день остается одной из значимых геоэкологических проблем, особенно для почв Арктического региона. Происходит активное изменение природной среды через разработку месторождений и сопутствующих ей технологических процессов. Последствия воздействия добычи полезных ископаемых в сложных климатических условиях Крайнего Севера многократно усиливаются вследствие низкой способности данных экосистем к самовосстановлению.

Для решения существующих экологических проблем и обеспечения устойчивого развития региона необходимо обладать объективной информацией о состоянии окружающей среды. Единственно возможный путь получения такой информации – мониторинг, включающий систему наблюдений, оценки и прогноза состояния природной среды, результаты которого обеспечат комплексную оценку экологического состояния окружающей среды, степень антропогенного воздействия, а также позволят сделать прогнозы развития экологических ситуаций с учетом внешних и внутренних факторов среды.

Для каждой природной зоны характерны свои типы почв, а Красноярский край, протянувшийся с севера на юг на огромные расстояния, характеризуется большей частью из существующих видов природных зон. Поэтому и почвы здесь многообразны.

Другая отличительная особенность данного региона – постоянный рост и расширение урбанизированных ландшафтов в связи активным освоением территории. В условиях сурового климата города являются центрами интеллектуальной деятельности, торговли, культуры, науки, производительного труда и социального развития. Именно в городах происходит экономическая и социальная эволюция человека, воспроизводятся политические, идеологические, управленческие,

демографические, этнические, экологические, правовые, градостроительные, градообслуживающие и другие отношения.

Количество так называемых городских почв увеличивается. Их отличительной особенностью является загрязнение тяжелыми металлами, которое на протяжении длительного времени остается стабильно высоким, а показатели хуже, чем в среднем по России.

Наиболее приемлемым способом восстановления почв, загрязненных тяжелыми металлами, является фитоэкстракция. Однако осуществление фитоэкстракции, как и любого другого способа ремедиации почв, имеет смысл при условии полного прекращения массированного загрязнения земель тяжелыми металлами. Проведенные анализ и обобщение данных литературы позволяют сформулировать следующие практические рекомендации:

- 1) при загрязнении почвы тяжелыми металлами, прежде всего, необходимо провести ее ремедиацию биопрепаратами или биокомпостами и затем приступить к фитоэкстракции тяжелых металлов;

- 2) для фитоэкстракции тяжелых металлов из загрязненных почв использовать сельскохозяйственные культуры;

- 3) для ускорения фитоэкстракции тяжелых металлов из загрязненных почв необходимо вносить в почву хелатообразующие агенты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арктический совет: Научные исследования в Арктике : [сайт]. – URL: <https://www.arctic-council.org/index.php/ru/o-sovete/nauchnye-issledovaniya-v-arktike> (дата обращения: 29.03.2023). – Текст : электронный.
2. Бешенцев, В. А. Криолитозона и криогенные процессы Ямала / В. А. Бешенцев // Горные ведомости. – 2015. – Т. 1, № 128. – С. 68-80.
3. Богоявленский, В. И. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане / В. И. Богоявленский // Арктика: экология и экономика. – 2014. – Т. 4, № 16. – С. 48-59.
4. Васильева, А.В. Арктика: новый вектор развития // Арктика: экология и экономика. – 2011. - № 1. – С. 20-25.
5. Вишневая, Ю. С. Оценка экологического состояния и степени загрязнения тяжелыми металлами почв Арктики / Ю. С. Вишневая, Л. Ф. Попова // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 2. – С. 96-104.
6. Вопросы экологического мониторинга и реабилитации нефтезагрязненных почв арктической зоны Якутии / Ю. С. Гляднецова, И. Н. Зуева, О. Н. Чалая, С. Х. Лифшиц // Арктика и Север. – 2012. – № 5. – С. 1-12.
7. Восстановление нарушенных земель: выявленные тенденции / М.Н. Игнатьева, В.Е. Стровский, В.В. Юрак, А.Н. Иванов // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 8. – С. 54-59.
8. Герасимова, М. И. Деградация почв: меодология и возможности картографирования / М. И. Герасимова, Н. А. Караваева, В. О. Таргульян // Почвоведение. – 2000. – № 3. – С. 358-365.
9. Глобальные изменения климата и почвенный покров / В. Н. Кудеяров, В. А. Демкин, Д. А. Гиличинский [и др.] // Почвоведение. – 2009. – № 9. – С. 1027-1042.
10. ГН 2.1.7.2041–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М.; 2006.

11. ГН 2.1.7.2511–09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. М.; 2009.
12. Горячкин, С. В. Почвенный покров севера (структура, генезис, экология, эволюция) / С. В. Горячкин. – Москва : ГЕОС, 2010. – 414 с.
13. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 2021 году». – Красноярск, 2022. – 317 с.
14. Данилов П.П., Боескоров В.С. Трансформация почв и почвенного покрова арктических и субарктических территорий Якутии в условиях изменения климата и техногенного воздействия. Проблемы региональной экологии. 2023. №2. С. 42-46.
15. Десяткин, А. Р. Увеличения глубины сезонного протаивания почв и водных баланс мерзлотных территорий / А. Р. Десяткин, Р. В. Десяткин // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции . – Белгород : Издательский дом "Белгород", 2016. – С. 347-348.
16. Дзись, Ю. И. Экологическая повестка дня Арктики: обратимы ли изменения климата? // The Newman in Foreign policy. – 2021. - № 62(106). – С. 8-10.
17. Карпачевский, Л. О. Экологическое почвоведение / Л. О. Карпачевский. – Москва : ГЕОС, 2005. – 336 с.
18. Короновский, Н. В. Общая геология: учебное пособие, электронное издание сетевого распространения / Н. В. Короновский. – Москва : "КДУ", "Добросвет", 2018. – 250 с. – URL: <https://bookonline.ru/node/798/> (дата обращения: 09.05.2023). – Режим доступа: свободный – ISBN 978-5-7913-1025-5
19. Косько М.К., Буценко В.В., Иванов В.Л. К тектонике Северного Ледовитого океана и его континентальной окраины. 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. Сборник научных трудов/ под. ред. д-ра геол.-мин. наук В.Л.Иванова.СПб.:ВНИИ Океангеология, 2008, с.6-43.

20. Красноярский край. Официальный портал. Электронный ресурс.
URL: <http://www.krskstate.ru/about/kray>
21. Красовская, Т. М. Природопользование Севера России / Т. М. Красовская. – Москва : ЛКИ, 2008. – 288 с.
22. Куликова О. А., Идентификация источника нефтяного загрязнения арктических почвогрунтов и их рекультивация IN-SITU методами / О. А. Куликова, А. Е. Карнаева, Е. А. Мазлова [и др.] // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2019. – № 6(291). – С. 27-33.
23. Лисовицкая, О. В. Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения / О. В. Лисовицкая, В. А. Терехова // Доклады по экологическому почвоведению. – 2010. – Т. 1, № 13. – С. 1-18.
24. Логинов, В.Г. Эколого-экономические последствия освоения нефтегазовых ресурсов для арктических систем / В.Г. Логинов, М.Н. Игнатьева, Л. М. Морозова // Известия УГГУ : электронный журнал. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskie-posledstviya-osvoeniya-neftegazovyh-resursov-dlya-arkticheskikh-ekosistem> (дата обращения: 22.04.2023).
25. Лукин, Ю. Ф. Российская Арктика или Арктическая зона / Ю. Ф. Лукин // Арктика и Север. – 2016. – № 23. – С. 171-185.
26. Матышак, Г. В. Деформации в почвах прерывистой криолитозоны Западной Сибири и их влияние на почвообразование / Г. В. Матышак, О. Ю. Гончарова, М. О. Тархов // Почвы - стратегический ресурс России : Тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв, Сыктывкар, 22 апреля – 08 2021 года / Отв. редакторы С.А. Шоба, И.Ю. Савин. Том Часть 3. – Москва-Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2021. – С. 774-776.
27. Методы исследования поверхностных углеводородных геохимических полей природного и техногенного происхождения / И.Н. Зуева,

Ю. С. Глязнецова, С.Х. Лифшиц [и др.] // Наука и образование. – 2009. – № 1. – С. 50-55

28. Методы определения тяжелых металлов в разбавленных сточных водах. М.: Колос, 1989. 123 с.

29. Методы оценки и прогноза агрофизического состояния почв : учебное пособие / Е.В. Шеин, С. И. Зинченко, М. В. Банников [и др.]. – Владимир : ГНУ Владимирский НИИСХ, 2009. – 106 с.

30. Митягина М.И., Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю. Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 5. – С. 130-149.

31. Мохов И.И. Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. М., 2022. С. 3—14.

32. Немцев С.Н. Содержание валовых и подвижных форм тяжёлых металлов в почве / Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева. – М., 2017. – С. 274–279.

33. Ноговицын, Р. Р. Геолого-экономические факторы освоения месторождений в Арктической зоне России / Р. Р. Ноговицын, Е. Э. Григорьева // Арктика: экология и экономика. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 334-348.

34. Ноговицын, Р. Р. Обеспечение экологической безопасности в Арктической зоне Российской Федерации / Р. Р. Ноговицын, А. М. Васильева // Экономика и экология. – 2018. – Т. 4, № 68. – С. 203-205.

35. Пансю, М. Анализ почвы : минералогические, органические и неорганические методы анализа : справочник / М. Пансю, Ж. Готеру; перевод с английского 2-го издания под ред. Д.А. Панкратова. – Санкт-Петербург : Профессия, 2014. – 799 с.

36. Пилясов, А.Н. Контуры Стратегии развития Арктической зоны России // Арктика. Экология и экономика. 2011. № 11, С. 38-47.

37. ПНД Ф 16.1.41–04. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом. М. 2004.
38. Попова, Л. Ф. Тяжелые металлы в почвах евро-арктических территорий / Л. Ф. Попова, М. В. Никитина // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 102-106
39. Почвенные ресурсы России. Почвенно-географическая база данных / С. А. Шоба, И. О. Алябина, В. М. Колесникова [и др.]. – Москва : ГЕОС, 2010. – 128 с.
40. Рудский, В. В. Основы природопользования : учебное пособие / Рудский В.В., Стурман В.И.. – Москва : Логос, 2014. – 208 с.
41. Рудский, В. В. Экология и природопользование Российской Арктики: состояние, проблемы, перспективы / В. В. Рудский // Северный регион: наука, образование, культура. – 2015. – Т. 2, № 32. – С. 187-198.
42. Саввинов Г.Н., Макаров В.С., Величенко В.В. Экосистемы Якутской Арктики: современные вызовы и угрозы. Проблемы региональной экологии. 2023. №2. С. 63-73.
43. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" – М.: Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021. – 469 с.
44. Томашунас, В. М. Изучение полярных почв и грунтов в рамках экспедиции «Ямал-Арктика 2012» / В. М. Томашунас, Е. В. Абакумов, В. А. Крыленков // Российские полярные исследования. – 2012. – № 4(10). – С. 35-37.
45. Тюлюш Т.С., Коротченко И.С. Экологическое состояние почв различных районов Красноярска. Вестник КРАСГАУ. 2018. № 6 (141). С. 283-288.
46. Хаустов, А. П. Охрана окружающей среды при добыче нефти / А. П. Хаустов, М. М. Редина. – Москва : Дело, 2006. – 552 с.

47. Хренов, В. Я. Почвы криолитозоны Западной Сибири: морфология, физико-химические свойства, геохимия / В. Я. Хренов. – Новосибирск : Наука, 2011. – 221 с.
48. Царалунга, А. В. Влияние антропогенного воздействия на почвы Арктики / А. В. Царалунга, А. И. Журихин // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2021. – № 1(3). – С. 289-300.
49. Человек и природа в Арктике. М.А. Гребенникова, И.В. Леонтьев, И.В. Лобанова, Н.А. Черкашина // Экологическая безопасность и природопользование. – 2018. – № 2. – С. 36-44.
50. Шполянская Н.А. Разномасштабные изменения климата и развитие криосферы Земли. // Пути эволюционной географии. 2016. С. 608-613
Шполянская Н.А. Плейстоцен-голоценовая история развития криолитозоны Российской Арктики «глазами» подземных льдов. Москва–Ижевск, АНО Институт компьютерных исследований, 2015. 345 с.
51. Экологические проблемы природо- и недропользования: Труды международной молодежной научной конференции. Том XIX / Под ред. В. В. Куриленко – СПб.: СПбГУ, 2019. – 450 с.
52. Якименко, Л. В. Арктическое природопользование: новая парадигма / Л. В. Якименко // Территория новых возможностей. – 2021. – № 2. – С. 109-118.
53. Froese D. G., Westgate J. A., Reyes A. V., Enkin R. J., and Preece, S. J.: Ancient permafrost and a future warmer Arctic, *Science*, 321, p. 1648.
54. Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G., Fortier D., Hugelius G., Knoblauch C., Romanovsky V., Schädel C., Schneider von Deimling T., Schuur, E. A. G. Shmelev D., Ulrich, M., and Veremeeva, A.: Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability, *Earth-Sci. Rev.*, 172: 75–86.
55. World Meteorological Organization. State of the Global Climate; WMO: Geneva, Switzerland, 2023; Volume 1316, p. 55.

56. Zhang T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview, *Rev. Geophys.*, 2005. 43, RG4002, <https://doi.org/10.1029/2004RG000157>.