

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

за 2025 год

по теме: ЭКОСИСТЕМНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЖЕТЫСУСКОЙ ОБЛАСТИ:
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕПОНИРУЮЩИХ СРЕД И РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Выполненный в рамках грантового финансирования № AP23488902

Объектом исследования является Жетысуская область.

Цель работы – исследование и оценка воздействия загрязнения депонирующих сред (снежного и почвенного покрова) на экосистемную устойчивость Жетысуской области с целью разработки эффективных стратегий по обеспечению экологической устойчивости региона.

Методы исследования включают химико-аналитический, хроматографический, атомно-абсорбционный и картографический методы, системный и сравнительный анализ, а также использование компьютерных технологии для обработки информации.

Согласно разделу 2 Календарного плана в текущем 2025 г. проведены полевые и лабораторные исследования по отбору снежных и почвенных проб для химико-токсикологического анализа. На основе полученного материала выполнена комплексная оценка уровня загрязненности снежного и почвенного покрова, проведен анализ их пространственного распределения и построены карты интенсивности загрязнения токсичными соединениями. Рассчитаны интегральные индексы загрязнения и экологического риска (*Cf*, *Er*, *RI*, *Igeo*), что позволило выявить критические зоны с повышенной нагрузкой и определить роль снежного покрова как временного депо, а почвы – как долговременного аккумулятора токсикантов. Впервые для региона проведена оценка экосистемной устойчивости, основанная на сопоставлении данных по снегу и почве, что обеспечило научную новизну и позволило сделать оценку экологических рисков.

2.1 Полевые и лабораторные исследования по отбору снежных и почвенных проб на химико-токсикологический анализ

Сбор полевых материалов. В рамках исследований, направленных на оценку химико-токсикологического состояния СП и почв области, полевая экспедиция для отбора проб СП проводилась в период с 20 января по 24 февраля, почвы с 23 апреля по 25 мая на установленных постоянных точках, равномерно распределенных по исследуемой территории (рисунок 1). Целью данного этапа работ было получение объективных данных о содержании ТМ, полихлорированных бифенилов (ПХБ) и других загрязняющих веществ в СП и почве.

Проводимые наблюдения включали отбор проб СП для анализа физико-химических параметров (взвешенные вещества, pH, органические вещества (по перманганатной окисляемости), минерализация), ТМ (Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Ni) и ПХБ с конгенерным составом, которые также определялись в пробах почвы.

Методика отбора проб. Во время экспедиционных исследований отборы проб снега произведены согласно общепринятой методике [1]. Для изучения физико-химических параметров, уровня накопления в СП ТМ и ПХБ отбор проб проводился на открытой ровной площадке, попутно с проведением измерений плотности снега и влагозапаса на снегомерном маршруте. Отбор проб снега проводили методом шурфа на всю мощность СП, за исключением 5-и см слоя над почвой, на площади 1x1 м² в полиэтиленовые мешки. Размеры шурфа замеряли по длине и ширине для расчета площади, на которую проектируются выпадения из атмосферы.

При отборе проб по методике исключаются попадание в пробу посторонних веществ, как в момент отбора, так и во время их хранения и транспортировки в лабораторию. В связи с тем, что содержание растворенных в осадках веществ невелико и

измеряется миллиграммами или даже долями миллиграмма в 1 дм³ воды, требуется строгое соблюдение условий отбора, хранения и анализа проб.



Рисунок 1 – Схема ключевых точек отбора проб СП и почвы

Доставленные в лабораторию пробы до их обработки хранились при температуре – 5...–15 °С. Для таяния снега пробы помещали в предварительно подготовленные тары. Отстоявшуюся пробу фильтровали через бумажный фильтр с белой лентой для дальнейшего химического и токсикологического анализа.

Отбор почвенных проб проводили на тех же постоянных точках после снеготаяния, где отбор выполнялся на пробной площадке из одного или нескольких слоев, или горизонтов методом конверта, по диагонали с таким расчетом, чтобы каждая проба представляла собой часть почвы, типичной для генетических горизонтов или слоев данного типа почвы. Количество точечных проб должно соответствовать ГОСТ [2]. Необходимым условием при отборе проб почвы является предохранение их от вторичных загрязнений на всех этапах подготовки. Пробы почвы, предназначенные для определения ТМ, отбирали инструментом, не содержащим металлов.

Объединенную пробу составляли путем смешивания точечных проб, отобранных на одной пробной площадке. Для химического анализа объединенную пробу составляли из пяти, точечных проб, взятых с одной пробной площадки. Масса объединенной пробы была не менее 1 кг. Для контроля загрязнения поверхностно распределяющимися, загрязняющими веществами (тяжелые металлы, ПХБ) – точечные пробы отбирали послойно с глубины 0-5 и 5-20 см массой не более 200 г каждая. Пробы почвы для химического анализа высушивали до воздушно-сухого состояния по ГОСТ [3]. Воздушно-сухие пробы хранили в матерчатых мешочках, в картонных коробках или в стеклянной таре.

Методика химико-токсикологического анализа. Анализы физико-химических показателей СП и воды были проведены в соответствии с современными общепринятыми методическими руководствами [4,5] и ГОСТами [6,7].

После таяния снега в получившейся воде сразу же определяли pH, органические вещества по перманганатной окисляемости, количество взвешенных веществ и минерализацию. Для определения pH использовали портативный измеритель pH/EC/TDS/температуры Hi9811-5 (фирмы «Hanna»).

В процессе реализации проекта для визуального определения гранулометрического состава почв воспользовались таблицей «Признаки для определения гранулометрического вида пород (по М.М. Филатову)», приведенной в работах В. Д. Ломтадзе [8,9].

Для определения химических веществ в почвенных пробах в лаборатории каждую отобранную пробу рассыпали на бумаге или кальке, сушили до воздушно-сухого состояния, затем разминая пестиком крупные комки, предварительно очищали от включений (камней, веток и других инородных частиц). Методом квартования почву массой 0,2 кг растирали в ступке пестиком и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Из полученной воздушно-сухой пробы почвы отбирали навеску с массой около 5,0 г. Для определения подвижных форм металлов использовался метод (РД 52.18.289-90) [10] обработки почвы ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8 и последующим определением металлов в полученном растворе атомно-абсорбционным анализом.

Тяжелые металлы в пробах определяли пламенным атомно-абсорбционным спектрометрическим методом с предварительной обработкой проб на атомно-абсорбционном спектрофотометре АА-7000 фирмы Shimadzu (Япония) (Приложение Е).

Для хроматографического анализа проводили экстрагирование проб п-гексаном на ПХБ. Около 50 мл экстракта с каждой пробы были анализированы в Испытательной лаборатории ТОО «Нутритест» Казахской Академии питания (аттестат аккредитации № KZ.T.02. E0177 от 06.05.2021 г.) (Приложение Ж).

Современные методы и подходы, используемые аналитиками при анализе объектов окружающей среды на содержание ПХБ, позволяют определять все конгенеры, несмотря на то что, ни одна хроматографическая колонка не может в настоящее время разделить все 209 компонентов ПХБ.

Определение ПХБ проводилось согласно СТБ ИСО 6468-2003 [11] на газовом хроматографе «Хромос ГХ-1000» с программным обеспечением, электронно-захватным детектором (ДЭЗ) и использованием капиллярной колонки длиной 30 м × 0,32 мм. Условия хроматографирования: температура колонки 220 °С, температура испарителя 240 °С, температура детектора 300 °С, расход газа-носителя (азот «осч») – 38 мл/мин. В качестве стандарта использовали ГСО состава раствора Совола в гексане, представляющего собой смесь ПХБ-52, ПХБ-101, ПХБ-138, ПХБ-153 и сумму тетра-, пента и гексахлорбифенилов.

2.2 Оценка уровня загрязненности снежного покрова, почвы и их пространственное распределение

Физико-химические параметры. Высота СП на исследуемой территории варьировала в широких пределах от 1,0 см (точка 54, район р. Иле) до 80,5 см (точка 28, с. Чимбулак). Наибольшее накопление снегозапаса было зафиксировано в горной зоне на точке 27 (с. Байзерен) и составило 17,7 кг/м². В то же время на равнинных участках снегозапас не превышал 1,0 кг/м² (точки 19, 20, 21, 31, 33, 51, 54), что может быть связано как с меньшим количеством осадков, так и с более активными процессами испарения и таяния снега под воздействием высокой солнечной радиации и ветровой активности [12].

В результате анализа установлено, что значения рН СП на территории Жетысуской области варьируют в пределах от 5,0 до 7,0, что соответствует реакции от слабокислой до нейтральной (рисунок 2). Подобный диапазон характерен для регионов, где на химический состав атмосферных осадков влияют как природные климатические условия, так и умеренные выбросы загрязняющих веществ техногенного происхождения [13].

Влияние на уровень кислотности в ряде точек, особенно в районе г. Талдыкорган, может оказывать деятельность промышленных предприятий. В частности, ТОО «Кайнар-АКБ», крупнейший аккумуляторный завод страны, который известен выбросами кислотных аэрозолей, которые способны снижать рН осадков. На химический состав атмосферы, также могут влиять и другие предприятия, расположенные в городской черте, за счет выбросов технологических аэрозолей и вторичных загрязнителей [14].

Минимальные значения рН были зафиксированы в отдельных точках 28 (с. Чимбулак), 38 (с. Аманбоктер) и 5 (ст. Каратас), где уровень кислотности варьировал от 5,0 до 5,4, что может свидетельствовать о присутствии кислотных атмосферных выпадений, образующихся при взаимодействии оксидов серы (SO₂) и азота (NO_x) с влагой в атмосфере. Источником оксидов, как правило, выступают выбросы от сжигания топлива и

промышленных процессов. В зимний период их накоплению способствует температурная инверсия, при котором загрязняющие вещества концентрируются в приземном слое воздуха [15,16].

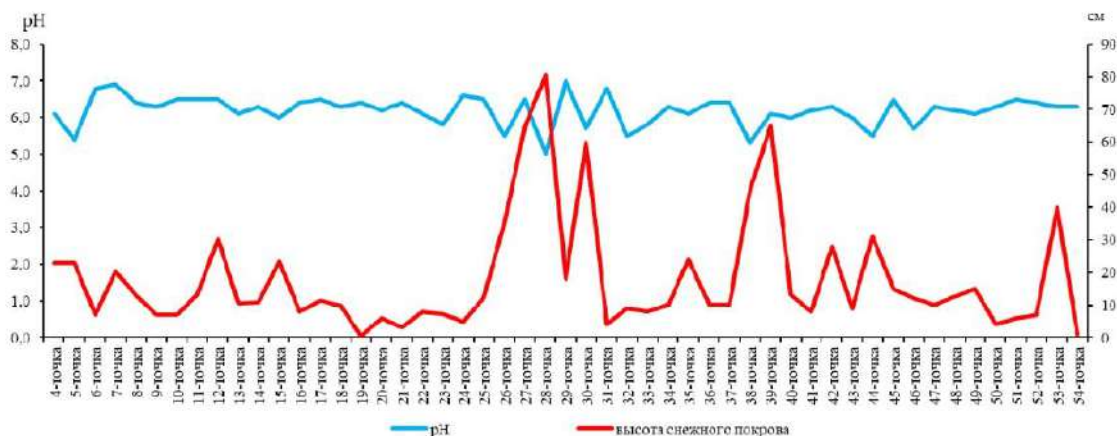


Рисунок 2 – Пространственное распределение значения рН с запасом снега

В центральной и южной частях территории области (точки 6, 29, 31) значения рН приближались к нейтральным и составляли от 6,8 до 7,0. Однако такие значения не обязательно свидетельствуют об отсутствии антропогенного воздействия. Поддержание нейтрального рН может быть связано с присутствием в атмосфере буферных соединений, способных нейтрализовать кислотные компоненты, в результате чего кислотность осадков маскируется, несмотря на возможное поступление загрязняющих веществ.

Значения минерализации варьировали от 50,7 мг/дм³ (точка 38, с. Аманбоктер) до 575 мг/дм³ (точка 31, район Песков Сарыесик-Атырау), что отражает наличие как фоновых, так и локальных источников загрязнения (рисунок 3).

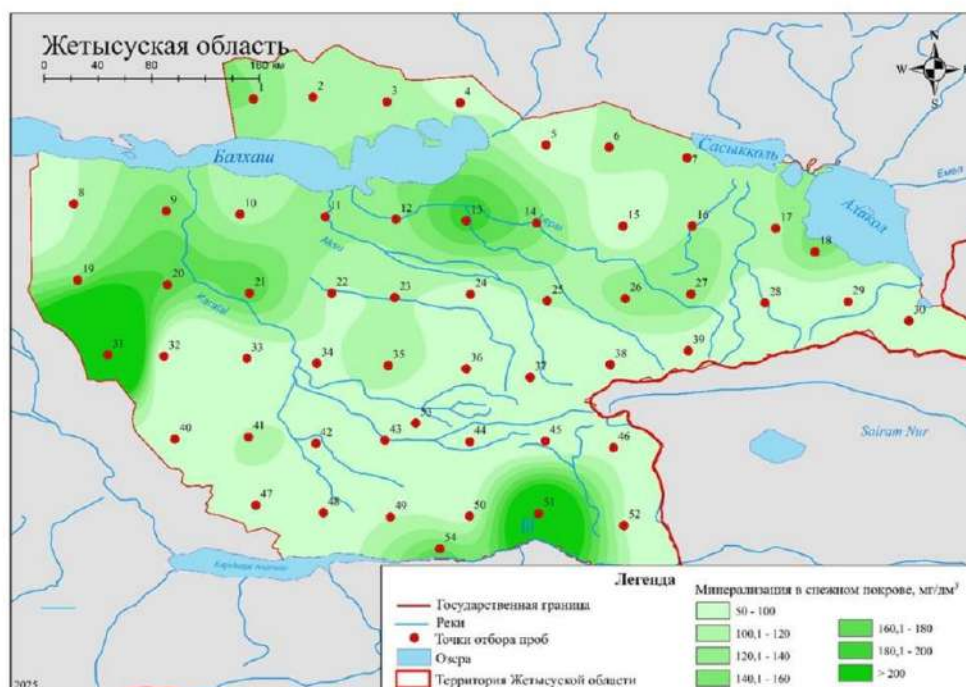


Рисунок 3 – Пространственное распределение минерализации СП

Наиболее высокие концентрации зафиксированы в точке 31 (район песков Сарыесик-Атырау) до 575 мг/дм³, в точке 51 (с. Акжазык) до 291 мг/дм³, в точке 13 (с. Лепсы) до 190 мг/дм³ и в точке 20 (с. Акжар) до 177 мг/дм³. Данные значения минерализации на несколько порядков выше, чем в других районах области, где минерализация не превышает 120 мг/дм³. Особенно выделяется точка 31, где уровень минерализации более чем в 11 раз превышает минимальные значения, зарегистрированные в точке 38 (50,7 мг/дм³). Такие значения, вероятно, связаны с поступлением аэрозольных частиц, насыщенных солями и минеральными компонентами, с поверхности пустынных и полупустынных ландшафтов. В условиях засушливого климата, при ограниченном количестве осадков и интенсивном ветровом переносе, эти частицы эффективно накапливаются в СП, отражая состав атмосферных выпадений в период осадконакопления. Низкие значения минерализации, напротив, характерны для более увлажненных и горных участков, где влияние фоновых осадков доминирует, а содержание примесей снижается за счет разбавления и меньшей запыленности атмосферы. Пространственное распределение общей минерализации коррелирует с орографическими и климатическими особенностями территории, типом подстилающей поверхности и степенью влияния аэрозольного транспорта, подтверждая роль СП как эффективного индикатора химического состояния атмосферы региона [15,16].

Зарубежные исследования также подтверждают, что в аграрных и засушливых регионах СП может служить надежным индикатором химического состояния окружающей среды и отражать как фоновые, так и локальные антропогенные воздействия [17,18]. Повышенное содержание ионов может указывать на наличие загрязнения воздуха и почвы, поступающего в атмосферу с пылью, автомагистралей и промышленными выбросами.

Одними из ключевых показателей загрязнения СП являются содержание взвешенных и органических веществ, включающих минеральные и органические микрочастицы, поступающие в атмосферу из различных источников. Результаты анализа показали, что концентрации органических веществ варьировали в пределах от 2,5 до 18,2 мгО/дм³, при среднем значении около 5,0 мгО/дм³. Наибольшее содержание органических веществ зафиксировано в точке 31 (пески Сарыесик-Атырау), где оно достигло 18,2 мгО/дм³. Также значительные концентрации наблюдаются в точках 34 и 51, где значения составили до 11,0 мгО/дм³ (рисунок 4).

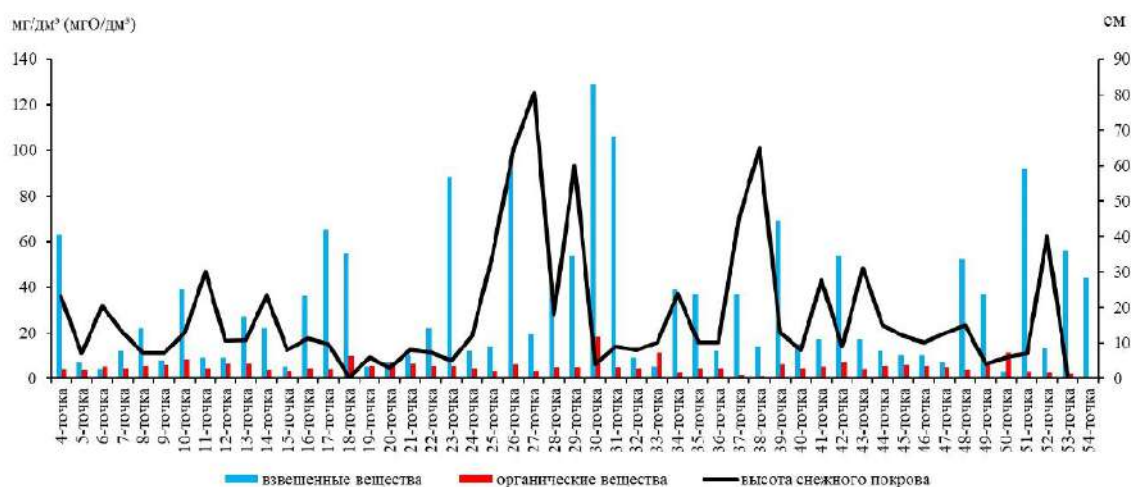


Рисунок 4 – Пространственное распределение содержания взвешенных и органических веществ с запасом снега

Концентрации взвешенных веществ также варьировали в широком диапазоне от 3,0 мг/дм³ (точка 50) до 129 мг/дм³ (точка 30). Повышенные уровни взвешенных веществ

зафиксированы в точках 23, 26, 31 и 39, что указывает на наличие локальных источников запыленности. В точке 34 высокий уровень загрязнения, вероятно, связан с промышленной активностью г. Талдыкорган, включая такие предприятия, как ТОО «Қайнар-АКБ» и ТФ «Ажар». В точке 31 наблюдается совокупное влияние автотранспортного коридора, сухих почв пустынных районов и выбросов промышленных объектов г. Текели. Повышенные концентрации в точке 51 могут быть обусловлены дорожной активностью, так как точка расположена вблизи автодороги. Данные участки представляют экологический риск, так как при таянии снега накопленные загрязняющие вещества могут поступать в поверхностные и грунтовые воды, приводя к их вторичному загрязнению. Следовательно, пространственное распределение органических и взвешенных веществ в СП указывает на значительное влияние антропогенных источников, особенно в районах с интенсивным промышленным и транспортным воздействием.

По результатам исследований установлено, что средняя концентрация биогенных веществ находится в следующих значениях, аммоний (NH_4^+) варьируется от 0,020 до 3,500 мг/дм³, нитриты (NO_2^-) от 0,005 до 0,066 мг/дм³, нитраты (NO_3^-) от 0,300 до 10,0 мг/дм³ и фосфаты (PO_4^{3-}) от 0,030 до 0,720 мг/дм³. Повышенные концентрации биогенных соединений зафиксированы на точках 31 (пески Сарыесик-Атырау), 51 (с. Акжазык) и 54 (гидропост 164 км, р. Иле). Наиболее значительное превышение ПДК аммония выявлено в точке 31, где его содержание составило 3,50 мг/дм³, что в 7 раз превышало ПДК. Несмотря на удаленность данной территории от крупных населенных пунктов, ее расположение вблизи крупной автомагистрали и открытый характер ландшафта способствуют поступлению загрязняющих веществ в результате аэрозольного переноса, в том числе пылевых частиц и продуктов выхлопа автотранспорта. Существенное превышение содержания аммония также отмечено в точке 54, где его концентрация составила 1,11 мг/дм³, что в 2,2 раза выше ПДК. Концентрации нитритов также превысили нормативы: в точке 54 зафиксировано максимальное значение до 0,066 мг/дм³, что в 3,3 раза выше допустимого уровня, а в точке 51 содержание нитритов составило 0,037 мг/дм³, что почти в два раза превышает норму. Концентрации нитратов во всех точках не превышали предельно допустимых значений, установленный предел в 9,0 мг/дм³ не был превышен; в частности, в точке 31 она составила 1,2 мг/дм³, а в точке 54 – 1,1 мг/дм³. Наибольшее превышение среди всех биогенных веществ зафиксировано по фосфатам: в точке 10 (пески Жаманжал) концентрация достигла 0,72 мг/дм³, что превышает допустимый уровень в 14,4 раза, а в точке 12 (с. Кокжиде) составило 0,50 мг/дм³, что в 10 раз выше нормы. Повышенное содержание биогенных соединений в СП на этих участках, вероятно, обусловлено не только локальными источниками, но и отдаленным атмосферным переносом загрязняющих веществ с северо-западных территорий. Орографические условия, открытая поверхность и господствующие направления ветров способствуют осаждению аэрозольных частиц, содержащих азот- и фосфорсодержащие соединения, что в условиях зимнего накопления приводит к их концентрации в снежном покрове. Таким образом, выявленные превышения отражают как локальные, так и трансграничные механизмы поступления биогенных загрязнителей в атмосферу региона.

Содержание тяжелых металлов. Снежный покров. Атомно-абсорбционный анализ охватывал 54 репрезентативные точки отбора проб, расположенные на различных высотах (от 350 до 1500, лишь в единичном случае до 2610 м над уровнем моря) и характеризующиеся разнообразием физико-географических условий, близостью населенных пунктов, также различной степенью антропогенной нагрузки (таблица 1).

По результатам исследований регистрируется значительное превышение ПДК по содержанию свинца, кадмия и никеля (таблица 2). Концентрация свинца превышает нормативные значения по всей территории области, достигая максимального уровня от 22,4 до 24,0 мкг/дм³ в районах г. Жаркент (51 точка) и г. Текели (53 точка), соответственно. На большей части исследуемой территории концентрация свинца составила от 11,5 до 19,8 мкг/дм³, что в среднем составляет 11,8 мкг/дм³ с превышением ПДК в 11,8 раз (рисунок

5). Высокие концентрации никеля превышающие ПДК наблюдаются, также на всей территории области от 2,9 до 11,0 мкг/дм³, что в среднем составляет 7,6 мкг/дм³, с превышением в 4,0 раза. В содержании кадмия в СП, наблюдается несколько иная картина, так, несмотря на меньшие концентрации от 2,9 до 7,2 мкг/дм³, и средними значениями до 1,8 мкг/дм³, он демонстрирует крайне высокую токсикологическую опасность, являясь индикатором промышленного и сельскохозяйственного загрязнения. Загрязнение СП наиболее выражено в предгорных районах Жонгар Алатау и близ крупных городов, что указывает на локализованное техногенное воздействие. Такая пространственная структура распределения загрязняющих веществ свидетельствует о значительном вкладе автотранспорта, особенно в зонах с интенсивным движением, а также о влиянии устаревших аккумуляторных систем и вторичных выбросов от промышленных объектов. Существенная концентрация загрязнителей в районах Текели и Талдыкоргана, где функционируют предприятия по переработке полиметаллических руд, подчеркивает роль этих источников в формировании техногенного фона. Таким образом, СП в этих зонах аккумулирует последствия как текущей, так и исторической промышленной и транспортной деятельности, выступая индикатором локального загрязнения атмосферы.

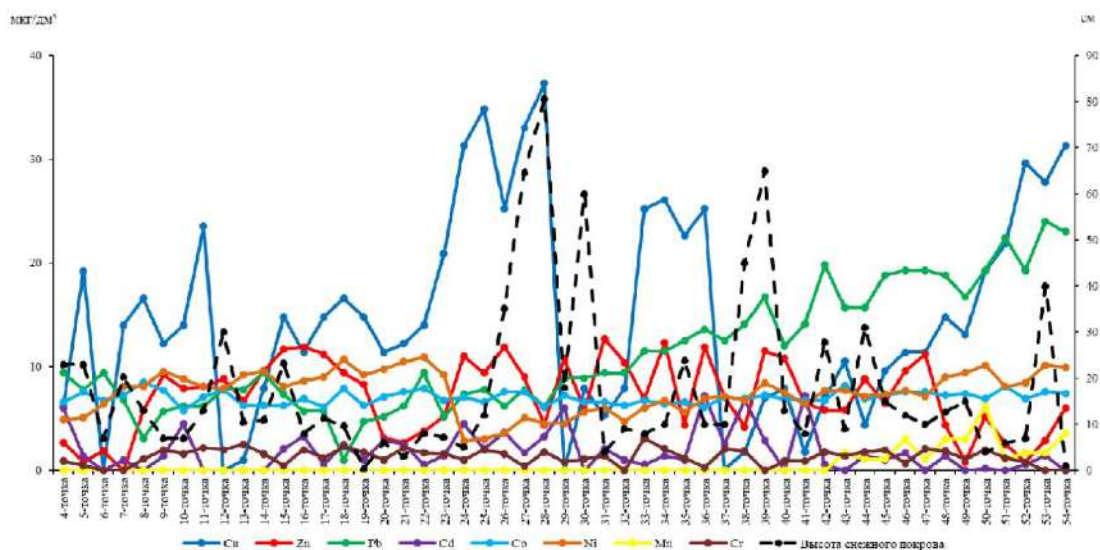


Рисунок 5 – Содержание ТМ в СП

В содержании остальных металлов наблюдается локальный характер не превышающие пределы нормативных значений. Как видно из рисунка 5, пространственный анализ данных подтверждает локализацию загрязнения вблизи населенных пунктов, транспортных магистралей и промышленных объектов, прежде всего в городах Текели, Талдыкорган, Ушарал и Жаркент.

Таблица 1 – Точки отбора проб СП с высотой над уровнем моря и запасом снега на 1 м²

Точки отбора проб	Высота над уровнем моря, м	Местоположение	Ближайшие крупные города	Запас снега, кг/м ²
4-точка	399	ст.Актогай	Ушарал	33,5
5-точка	350	ст.Каратас	Лепси	29,8
6-точка	367	ст.Актогай	Ушгобе	15,0
7-точка	370	км 615	Лепси	20,4
8-точка	350	Пески Сарыесик-Атырау	Ушарал	16,1
9-точка	356	с.Аккиик	Ушарал	9,0
10-точка	361	Пески Жаманжал	Ушгобе	13,2

Точки отбора проб	Высота над уровнем моря, м	Местоположение	Ближайшие крупные города	Запас снега, кг/м²
11-точка	356	с.Ульги	Ушарал	14,9
12-точка	364	с.Кокжиде	Уштобе	54,0
13-точка	415	с.Лепсы	Уштобе	12,9
14-точка	456	с.Коктерек	Матай	16,2
15-точка	511	Пески Таскаракум	Ушарал	53,2
16-точка	477	с.Кызылаңи	Сарканд	13,3
17-точка	360	с.Казахстан	Уштобе	15,4
18-точка	503	с.Коктума	Сарканд	14,0
19-точка	371	Пески Сарыесик-Атырау	Лепси	5,1
20-точка	374	с.Акжар	Лепси	6,5
21-точка	408	с.Жасталап	Уштобе	0,9
22-точка	380	с.Мулалы	Лепси	9,1
23-точка	405	с.Егинеу	Ушарал	7,8
24-точка	455	с.Копа	Матай	7,3
25-точка	541	с.Шолакозек	Ушарал	20,4
26-точка	620	с.Койлык	Уштобе	54,8
27-точка	1157	с.Байзерен	Текели	137,6
28-точка	1513	с.Чимбулак	Жаркент	140,0
29-точка	860	ст.Коктума	Талдыкорган	23,7
30-точка	671	с.Токты	Талдыкорган	125,2
31-точка	382	Пески Сарыесик-Атырау	Ушарал	2,5
32-точка	431	ст.Кальпе	Уштобе	5,6
33-точка	435	ст.Кальпе	Матай	5,1
34-точка	658	с.Ескедьды би	Уштобе	12,9
35-точка	674	с.Алмалинка	Талдыкорган	10,8
36-точка	1339	с.Капал	Талдыкорган	21,8
37-точка	1427	с.Баласаз	Жаркент	19,9
38-точка	1557	с.Аманбоктер	Жаркент	23,7
39-точка	1034	с.Лепсинск	Талдыкорган	28,1
40-точка	699	Пески Мойынкум	Талдыкорган	14,7
41-точка	717	ст.Моюн-Кум	Талдыкорган	16,9
42-точка	788	с.Алгабас	Сарканд	13,7
43-точка	1125	с.Бигаш	Текели	10,4
44-точка	1564	с.Аралтобе	Жаркент	46,8
45-точка	2610	с.Енбекши	Жаркент	19,7
46-точка	1692	с.Сарымбель	Жаркент	17,4
47-точка	835	с.Самен	Сарканд	14,5
48-точка	1259	с.Коянкоз	Когалы	18,9
49-точка	1184	с.Басши	Когалы	34,4
50-точка	1284	с.Айнабулак	Талдыкорган	16,8
51-точка	766	с.Акжазык	Талдыкорган	5,4
52-точка	597	с.Ават	Ушарал	4,8
53-точка	1015	г. Текели	Талдыкорган	21,3
54-точка	486	ГП 164 км (р. Иле)	Сарканд	1,5

Таблица 2 – Содержание ТМ в СП

Тяжелые металлы, мкг/дм ³	Cu	Zn	Pb	Cd	Co	Ni	Mn	Cr
min	0,0	0,8	1,0	0,0	5,8	2,9	0,0	0,0
max	37,3	12,7	24,0	7,2	8,2	10,9	6,2	3,1
среднее	15,3	7,5	11,8	1,9	7,0	7,6	0,6	1,4
ПДК	1000	5000	1,0	1,0	10,0	2,0	10,0	5,0

Содержание меди, цинка и кобальта хотя и находится в пределах, не превышающих ПДК, однако их пространственное распределение свидетельствует о наличии техногенного влияния различной степени интенсивности. Концентрации меди варьируют в широком диапазоне от 0,1 до 37,3 мкг/дм³, при среднем значении 14,9 мкг/дм³. Высокие значения (37,3 мкг/дм³) зарегистрированы на точке 28 (с. Чимбулак), а также на точках 24-27, 33-36 и 54 от 11,4 до 37,3 мкг/дм³. Концентрации цинка варьировали от 0,8 до 12,7 мкг/дм³, при средней концентрации 7,1 мкг/дм³. Повышенные значения цинка также были обнаружены на точках 16, 26, 31, 34 и 36 от 11,2 до 26,1 мкг/дм³. Концентрации кобальта выявлены в относительно стабильных значениях от 5,8 до 8,5 мкг/дм³, что в среднем составляет 7,0 мкг/дм³.

Таким образом, выявленные пространственные особенности распределения меди, цинка и кобальта в СП указывают на наличие локальной антропогенной нагрузки, формирующейся под воздействием совокупности факторов. Основным источником поступления в атмосферу является автотранспорт, через выбросы выхлопных газов, абразивный износ тормозных колодок, шин и других узлов, содержащих медь, цинк и кобальт. Существенный вклад вносят и промышленные объекты, как действующие, так и выведенные из эксплуатации, особенно в районах с исторически развитой горнорудной и металлургической деятельностью (например, в г. Текели, Талдыкоргане и прилегающих населенных пунктах). Дополнительным механизмом поступления загрязняющих веществ в атмосферу может быть вторичное загрязнение, возникающее в результате ветровой эрозии, при которой загрязненные частицы поднимаются с поверхности почвы, дорожных покрытий и других инфраструктурных объектов. Такой процесс особенно выражен в открытых ландшафтах с низкой степенью растительного покрова, где ничто не препятствует переносу частиц. Кроме того, источниками загрязнения могут служить продукты коррозии инженерных сооружений, а также износ антикоррозионных покрытий и лакокрасочных материалов, содержащих цинк. Совокупное влияние этих факторов формирует устойчивое фоновое загрязнение атмосферного воздуха, которое аккумулируется в СП. Благодаря способности накапливать вещества, выпадающие из атмосферы в течение зимнего сезона, снег выступает в роли чувствительного индикатора техногенного воздействия, отражая как текущее загрязнение, так и отложенные последствия длительной антропогенной нагрузки.

Результаты анализа показывают, что наибольшие концентрации ТМ в СП приходятся на территории, прилегающие к промышленным районам. Особенно выраженные уровни загрязнения зафиксированы в окрестностях г. Текели, а также в населенных пунктах Лепсы, Капал, Матай, Ушарал и Талдыкорган, где сосредоточены действующие или исторические объекты добычи и переработки полиметаллических и медных руд. Совпадение зон с повышенным содержанием металлов с расположением горнодобывающих предприятий свидетельствует о техногенной природе этих загрязнений. Помимо этого, прослеживается отчетливая связь между уровнем загрязнения и транспортной инфраструктурой: более высокие концентрации ТМ отмечены в пробах, отобранных вдоль автомобильных трасс и вблизи городов с интенсивным движением, таких как Талдыкорган, Ушарал и Жаркент. Таким образом, СП аккумулирует широкий спектр загрязняющих веществ, отражая суммарное воздействие как горнорудной, так и

транспортной деятельности, и может рассматриваться в качестве надежного индикатора атмосферного состояния и распределения техногенной нагрузки на территорию.

Почвенный покров. Содержание ТМ в почвах области находится на уровне, не превышающем ПДК, однако их пространственное распределение позволяет выделить закономерности, указывающие на сочетание фоновых геохимических условий и локального антропогенного влияния (таблица 3).

Таблица 3 – Содержание ТМ в почве

Показатели	Тяжелые металлы, мг/кг					
	Cu	Zn	Pb	Cd	Co	Ni
min	0,003	0,007	0,003	0,0	0,014	0,0
max	0,057	0,257	0,040	0,007	0,037	0,027
среднее	0,020	0,023	0,006	0,002	0,017	0,003

Концентрации меди в почве зарегистрированы в пределах от 0,003 до 0,037 мг/кг со средними значениями 0,020 мг/кг. Высокие значения меди были характерны для почв с тяжелым гранулометрическим составом (тяжелые суглинки и супеси), особенно на точках 24, 26 и 28, что объясняется высоким сорбционным характером, способствующей фиксации меди в нерастворимых формах. Напротив, малые значения меди зафиксированы в песчаных и супесчаных почвах с пониженной коллоидной емкостью, где миграция металлов происходит активнее. Содержание цинка в почвах был в значениях от 0,007 до 0,027 мг/кг, при среднем значении до 0,023 мг/кг. Более высокие концентрации цинка отмечены в восточной и юго-восточной частях региона (Жаркент, Сарканд), что указывает на возможное локальное загрязнение вблизи населенных пунктов и транспортных узлов. Свинец в почвах встречается в диапазоне 0,003–0,009 мг/кг и характеризуется очень низкой подвижностью, что регистрируется в районах с легкими почвами и минимальным промышленным влиянием, за исключением восточной части, где возможно влияние трансграничного переноса. Концентрации кадмия варьируют от 0,001 до 0,004 мг/кг, причем повышенные концентрации зафиксированы в районах с высокой минерализацией почв, таких как Сарканд, Талдыкорган и приозерные равнины у оз. Жаланашколь. Такое распределение, вероятно, связано с влиянием солевого состава почв, который может способствовать его временному накоплению в отдельных участках, однако нейтрально-щелочная среда почв и преобладание глинистого и суглинистого состава с высокой сорбционной способностью существенно ограничивают миграцию кадмия, снижая его биодоступность и экологическую значимость. Кобальт, присутствующий в пределах от 0,014 до 0,037 мг/кг (в среднем 0,017 мг/кг), демонстрирует пространственную стабильность, однако повышенные значения регистрируются в глинистых почвах центральной и южной части области, что согласуется с их способностью к длительному удержанию металлов. Концентрации никеля варьируют в пределах 0,001–0,012 мг/кг, при этом более высокие значения зафиксированы в восточной части региона (точки 26 и 28), где почвы характеризуются повышенным содержанием глинистых фракций и минерализованных солей, что способствует аккумуляции элемента за счет сорбционных свойств и ограниченной миграции в подобных условиях.

Содержание ТМ в почвах области в целом находится на уровне фоновых значений и не превышает установленные нормативы. Согласно экологическим регламентам РК, предельно допустимые концентрации (ПДК) для почв составляют: для меди – 55,0 мг/кг, цинка – 100 мг/кг, свинца – 32,0 мг/кг, кадмия – 2,0 мг/кг, кобальта – 5,0 мг/кг, никеля – 40,0 мг/кг. Сопоставление с фактическими результатами показывает, что максимальные выявленные значения существенно ниже этих порогов.

На основании данных гранулометрического анализа (диаграмма Ферре) и химических характеристик почв области установлено, что кислотно-щелочной режим и минерализация почв тесно связаны с их текстурой и пространственным положением

(рисунок 6). Значения pH варьируют в широком диапазоне от 5,7 до 8,1. Анализ распределения pH показал, что на большей части территории преобладают нейтральные и слабощелочные почвы. Повышенные значения pH (до 8,1) отмечены преимущественно в восточных и юго-восточных районах, где преобладают тяжелые суглинистые и глинистые почвы. Такие участки характеризуются низкой кислотностью, что благоприятствует фиксации ТМ в нерастворимых формах и, как следствие, снижает их подвижность. Напротив, более кислые почвы с pH ниже 6,5 выявлены в ограниченных районах с преобладанием песчаных и супесчаных текстур, где минералогический состав слабее влияет на буферные свойства, а металлы потенциально могут проявлять более высокую подвижность.

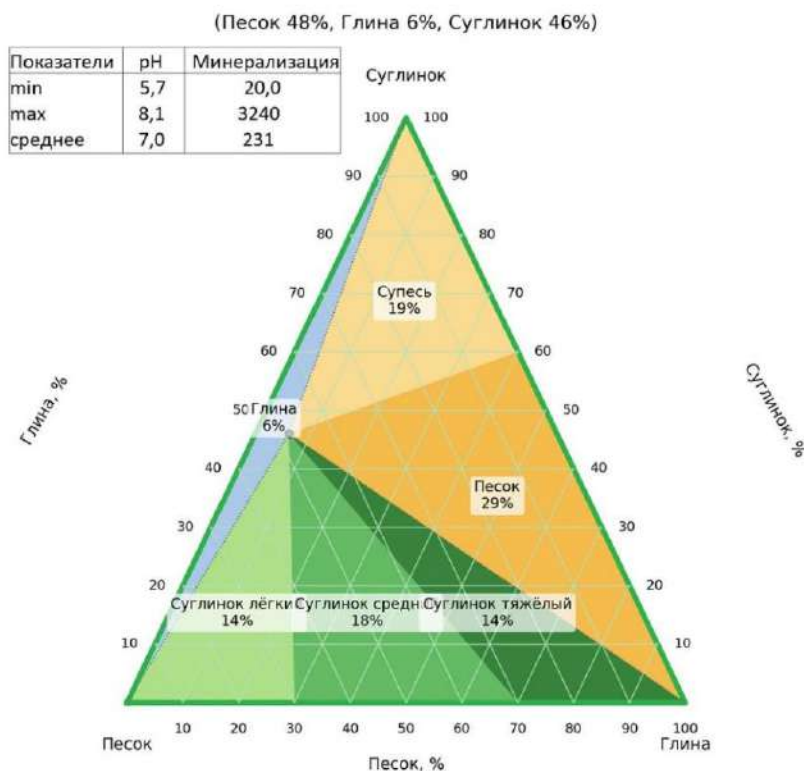


Рисунок 6 – Гранулометрический состав, pH и минерализация почв

Минерализация почв колеблется в пределах от 20 до 3240 мг/дм³. Высокие значения минерализации зафиксированы в восточных и юго-восточных районах (предгорья Жонгар Алатау, приозерные низины озер Жаланашколь и Балкаш), где также преобладают тяжелые суглинки. Такие почвы, благодаря высокой емкости к поглощению ила и ионов, выступают своеобразными геохимическими аккумуляторами. Высокая минерализация способствует ионному насыщению почвенного раствора, снижая растворимость ионов металлов и способствуя их осаждению в твердую фазу. В то же время, в песчаных и супесчаных почвах с низкой минерализацией (менее 100 мг/дм³) сорбционные свойства выражены значительно слабее, что ограничивает долговременное удержание загрязняющих веществ.

Гранулометрический состав демонстрирует, что до 46 % почв относится к различным суглинкам – легкому, среднему и тяжелому, а также к пескам (около 29 %) и супесям (19 %). Такая текстура определяет способность почв к аккумуляции или миграции растворенных веществ. Глинистые и суглинистые почвы, обладающие высоким содержанием мелкодисперсных фракций, отличаются развитой поверхностью сорбции и способны надолго удерживать как соли, так и ТМ. Песчаные и супесчаные почвы, напротив, действуют как транзитные среды, в которых миграционные потоки преобладают над

аккумуляцией, особенно в условиях слабой минерализации. Указанные почвенные характеристики формируют устойчивую геохимическую обстановку, при которой загрязняющие вещества способны накапливаться в верхних горизонтах, не проникая в более глубокие слои и не распространяясь активно по вертикальному профилю.

Статистическое распределение концентраций ТМ в почвах, представленное в виде box-plot (рисунок 7), демонстрирует четко выраженные различия в степени variability элементов, а также позволяет судить о характере их накопления. Для меди диапазон концентраций составил от 0,003 до 0,037 мг/кг, при этом наблюдается заметная variability значений, однако даже максимальные уровни содержания остаются более чем в тысячу раз ниже установленных нормативных пределов, что свидетельствует об отсутствии экологически значимого загрязнения. Аналогичная картина наблюдается и по цинку, значения которого варьируют от 0,007 до 0,027 мг/кг. Хотя для цинка отмечены отдельные выбросы, их значения остаются в пределах, не представляющих риска, и в сотни раз ниже допустимых уровней. Свинец характеризуется меньшим диапазоном от 0,003 до 0,009 мг/кг, причем распределение значений носит устойчивый и равномерный характер, без признаков выраженной аномальности, а его концентрации также существенно уступают установленным ПДК. Кадмий, содержание которого колеблется от 0,001 до 0,004 мг/кг, демонстрирует исключительно фоновую природу, поскольку его уровни в сотни раз ниже предельных значений, и в рассматриваемом диапазоне не отмечено значимых колебаний. Диапазон значений для кобальта (0,014-0,022 мг/кг) также отличается стабильностью и подтверждает равномерное распределение элемента по территории. Никель зафиксирован в диапазоне от 0,001 до 0,012 мг/кг и имеет наименьшие значения среди всех элементов, при этом даже максимальные концентрации ниже нормативных уровней.

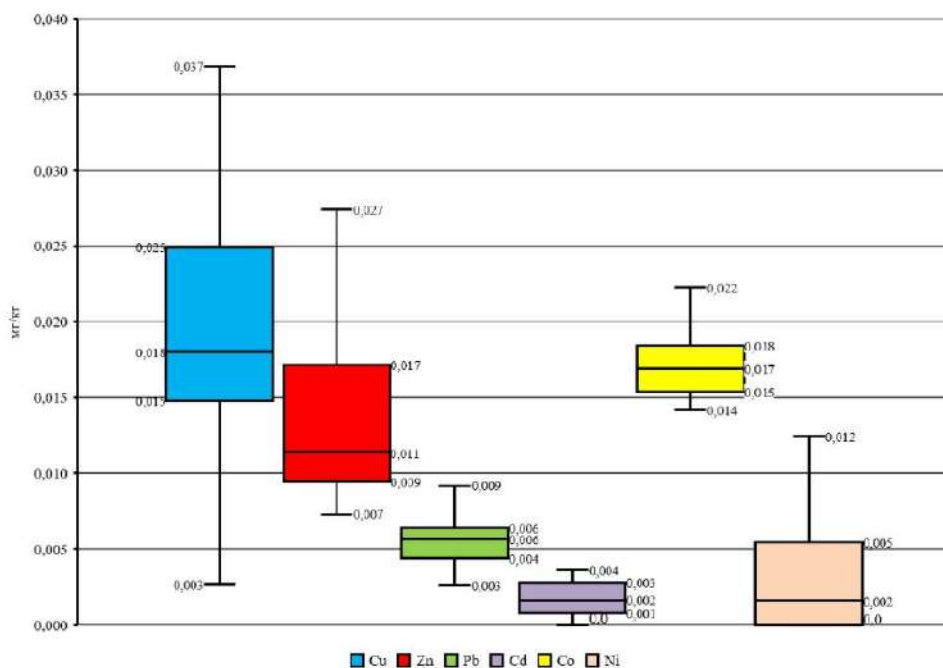


Рисунок 7 – Статистическое распределение (box-plot) концентраций ТМ в почвах

Таким образом, статистическая обработка результатов подтверждает, что содержание ТМ в почвах области находится на безопасном уровне, значительно ниже установленных ПДК. Наибольшую variability среди всех элементов демонстрируют медь и цинк, что, вероятно, связано с локальными геохимическими условиями или слабо выраженным влиянием отдельных антропогенных источников. В то же время такие

элементы, как свинец, кадмий, никель и кобальт, проявляют более стабильные, равномерные значения, близкие к естественному геохимическому фону.

Полихлорированные бифенилы. Снежный покров. На основании полученного аналитического материала, можно прежде всего отметить о том, что ПХБ, зарегистрированы во всех образцах снега, подверженных хроматографическому анализу. Концентрация токсиканта в СП изменяется в пределах от 0,020 до 0,040-0,042 мкг/дм³ (таблица 4). Горная и равнинная территорий, где расположены точки 30, 37, 50 и 12, 15, 17, 25, 35 соответственно, выделяются сравнительно малой концентрацией ПХБ в пределах 0,020-0,036 мкг/дм³, в среднем 0,030 мкг/дм³.

Таблица 4 – Концентрация и конгенерный состав ПХБ в СП изученной территории

Место отбора проб	Конгенеры	Сумма ПХБ, мкг/дм ³
6 точка		0,034
12 точка		0,028
15 точка		0,029
17 точка		0,036
19 точка		0,022
25 точка		0,024
30 точка	40; 42; 44; 48; 49; 52; 66,95; 70,76;	0,020
32 точка	74; 82; 85; 86; 87,115; 97; 101; 105;	0,042
35 точка	110; 114; 118; 119; 121; 128; 129;	0,032
37 точка	137; 138; 141; 146; 151; 153; 155;	0,036
39 точка	171	0,034
48 точка		0,038
50 точка		0,033
52 точка		0,040
53 точка		0,041

Повышенная концентрация ПХБ до 0,036 и 0,041 мкг/дм³ (в среднем 0,039 мкг/дм³) отмечалась в СП урбанизированной территории (точки 17, 52, 53). Максимальное значение концентрации токсиканта зарегистрировано в пустынной зоне (0,042 мкг/дм³) лишь на точке 32, содержание его в снеге остальных точек было невысокое.

В образцах снега, подвергнутых хроматографическому анализу, идентифицирован в общей сложности 31 индивидуальный конгенер. Найденные конгенеры входили в гомологические группы от дихлорбифенилов до гептахлорбифенилов.

Встречаемость найденных конгенов в анализированных пробах характеризуется следующими данными: 93 % встречаемость принадлежит легкому конгенеру ПХБ 44, относящиеся к гомологической группе дихлорбифенилов. Предположительно этот конгенер имеет средний уровень токсичности. Такая высокая встречаемость данного изомера ПХБ в образцах изучаемых нами природных объектах не зарегистрирована. Относительная доля «маркерных» конгенов ПХБ 52, 138 и 153 из гомологических групп тетра-гексахлорбифенилов составила соответственно 60, 53 и 73 %. До 60 % достигало содержание конгенов ПХБ 97 и 151, относящихся к гомологическим группам пента-гексахлорбифенилам, имеющим средний уровень токсичности. Содержание высокохлорированного конгенера ПХБ 171 из гомологической группы гептахлорбифенилов также достигает достаточно высоких значений – 47 %.

Согласно исследованиям ведущих ученых данной области [19], на содержание соединений СО₂ в атмосферных осадках влияют два основных типа источников загрязнения: локальные источники и глобальный перенос. Преобладание в составе ПХБ низкокхлорированных конгенов (дихлорбифенилов и трихлорбифенилов) свидетельствует о дальнем переносе токсикантов в район отбора проб. Доминирование в суммарной концентрации ПХБ конгенов, относящихся к гомологической группе тетра-, пента и

гексахлорбифенилов, является показателем сходства состава обнаруженных ПХБ с составом основной смеси Совол, которая применялась в СССР. Следовательно, это говорит об участии в формировании состава ПХБ в основном локальных или региональных источников загрязнения в районе места пробоотбора.

Следовательно, результаты проведенных хроматографических анализов дают основание считать, что на формирование состава ПХБ СП изученной территории оказывают влияние как локальные, региональные источники загрязнения, так и дальний перенос токсикантов в районы отбора проб.

Наиболее важным вопросом, естественно, следует считать анализ присутствия среди конгенеров ПХБ, обладающих более высокими токсичными свойствами, которыми являются строго контролируемые «маркерные» и диоксиноподобные изомеры.

Из приведенных в таблице 5 материала прежде всего можно увидеть, что концентрация найденных диоксиноподобных и «маркерных» конгенеров близки между собой и характеризуется значениями одного порядка.

Таблица 5 – Содержание «маркерных» и диоксиноподобных конгенеров в СП

Точки отбора проб	Сумма ПХБ, мкг/дм ³	маркерные								диоксиноподобные							
		ПХБ 52		ПХБ 101		ПХБ 138		ПХБ 153		ПХБ 105		ПХБ 114		ПХБ 118			
		мкг/дм ³	%	мкг/дм ³	%	мкг/дм ³	%	мкг/дм ³	%	мкг/дм ³	%	мкг/дм ³	%	мкг/дм ³	%	мкг/дм ³	%
6 точка	0,034	0,003	10			0,003	9			0,002	6	0,003	7				
12 точка	0,028																
15 точка	0,029			0,002	6			0,004	12	0,002	6						
17 точка	0,036	0,006	18					0,002	6			0,002	5				
19 точка	0,022	0,005	20			0,002	9	0,002	11								
25 точка	0,024					0,002	9	0,002	7			0,003	11				
30 точка	0,020							0,003	16								
32 точка	0,042	0,008	18	0,002	6	0,004	10	0,002	4								
35 точка	0,032	0,002	6			0,002	5	0,003	11								
37 точка	0,036			0,002	5							0,002	7				
39 точка	0,034							0,003	9	0,002	5						
48 точка	0,038	0,003	7			0,005	13					0,002	7				
50 точка	0,033	0,003	8			0,002	6	0,007	21					0,003	8		
52 точка	0,040	0,002	6	0,002	4			0,003	8	0,002	4			0,003	7		
53 точка	0,041	0,002	5			0,003	6	0,002	6	0,002	6	0,002	5				

Абсолютная концентрация «маркерных» конгенеров в отдельных образцах снега была в интервале от 0,002 до 0,008 мкг/дм³, а диоксиноподобных в пределах 0,002-0,003 мкг/дм³. Относительное содержание «маркерных» менялось от 4 до 20 %, а диоксиноподобных изомеров в интервале 4-11 %.

Представляет интерес сопоставить приведенный выше материал с фактическими данными, полученными нами во время исследования динамики и распространения ПХБ в СП обширной территории Юго-Восточного Казахстана, включая Иле-Балкашский бассейн.

В 2014 и 2015 гг. суммарная концентрация ПХБ в СП г. Алматы составила от 0,0-3,79 мкг/дм³ и от 0,19 до 0,66 мкг/дм³ соответственно. В снеговой воде территории г. Талгар зарегистрирована при значениях соответственно 0,0-0,80 и 0,12-0,33 мкг/дм³ [20,21].

В 2018-2020 гг. объектом исследования ПХБ в СП являлась территория Алматинской агломерации (АА), созданной в 2016 г. в пределах Юго-восточной части Казахстана. Во время этих исследований [22,23] среднее содержание ПХБ менялось в отдельные годы в снеге горной территории в пределах 0,005-1,942 мкг/дм³, г. Алматы – от 0,009 до 0,071 мкг/дм³, в снеге малых городов и малых населенных пунктов в интервале 0,016-0,225 и 0,007-0,093 мкг/дм³ соответственно.

В 2021 г. суммарная концентрация ПХБ в СП дельты р. Иле была в интервале 0,088-0,397 мкг/дм³, а на точках, расположенных в зоне Государственного природного резервата (ГПР) «Иле-Балкаш», среднее содержание токсиканта в снеговой воде составило 0,227 мкг/дм³ [24,25].

Из всего приведенного выше сравнительного материала видно, что уровень загрязненности ПХБ СП территории Жетысуской области был значительно ниже, чем в снеге исследованного нами в предыдущие годы большого региона, хотя некоторые точки отбора проб снега находились в непосредственной близости к ранее изученным зонам. Однако, следует отметить, что во всех собранных образцах снега зарегистрированы ПХБ и как было указано выше, найденные токсиканты имели различное происхождение.

Почвенный покров. На территории Жетысуской области в 2024 г. пробы почв для анализа ПХБ отобраны на 52 точках. Такое подробное исследование позволило получить достаточно полный материал по характеру распространения этих токсикантов в почвенном покрове изучаемой территории. С учетом результатов этих исследований, в 2025 г. сбор почвенных образцов проводили на наиболее характерных точках, расположенных в различных зонах территории области (таблица 6).

На основании полученного аналитического материала, можно прежде всего отметить о том, что ПХБ, как и в 2024 г., зарегистрированы во всех образцах почв, подверженных хроматографическому анализу. Концентрация токсиканта в пробах почв изменяется в довольно узких пределах от 0,018 до 0,045 мкг/кг.

Таблица 6 – Общая характеристика уровня загрязненности ПХБ почв

Место отбора проб	Конгенеры	Сумма ПХБ, мкг/кг
6 точка	40; 41,64,71; 42; 44; 48; 49; 52; 66,95; 70,76; 74; 82; 85; 86; 87,115; 97; 101; 105; 110; 114; 118; 119; 121; 128; 129; 137; 138; 141; 146; 151; 153; 155; 171	0,018
12 точка		0,031
15 точка		0,037
17 точка		0,034
19 точка		0,035
25 точка		0,037
30 точка		0,045
32 точка		0,032
35 точка		0,021
37 точка		0,037
39 точка		0,030
48 точка		0,023
50 точка		0,035
52 точка		0,027
53 точка		0,025

Пустынная и полупустынная территории, где расположены точки 6, 19, 32, 48, выделяются сравнительно малые концентрацией ПХБ в пределах 0,018-0,035 мкг/кг. Сравнительно повышенным содержанием токсиканта характеризуется почвенный покров горной зоны в пределах 0,027-0,045 мкг/кг (точки 30, 37, 50 и 52). Суммарные значения концентрации ПХБ в интервале 0,021 до 0,037 мкг (точки 12, 15, 17, 25 и 35) зарегистрированы в почвенном покрове равнинной зоны, непосредственно близкие к ним суммарные концентрации токсиканта (0,025-0,034 мкг/кг) зарегистрированы в почвах урбанизированных территорий, т.е. в районе городов и крупных населенных пунктов (точки 17, 52, 53).

В образцах почв, подвергнутых хроматографическому анализу, идентифицировано в общей сложности 32 индивидуальных конгенера. Найденные конгенеры входили в гомологические группы от тетрахлорбифенилов до гептахлорбифенилов.

Встречаемость найденных конгенеров в анализируемых пробах от 2 до 41 %. Наиболее высокая встречаемость (41 %) принадлежит легкому конгенеру ПХБ 44,

относящиеся к гомологической группе тетрахлорбифенилов, до 26 % отмечен «маркерный» конгенер ПХБ 153. В почвенных пробах, собранных в 2024 г., 69 % встречаемость принадлежала конгенеру ПХБ 97, относящиеся к гомологической группе пентахлорбифенилов.

Конгенер 97 в составе ПХБ почвенного покрова предгорной и равнинной части Северного склона Иле Алатау, распространен довольно широко. Согласно результатам наших исследований территории АА, в почвах территории г. Алматы и малых городов (Каскелен, Есик и др.), а также некоторых населенных пунктов (Боралдай) ПХБ 97 регистрировался в частых случаях и в повышенных концентрациях. Наиболее высокое содержание, достигавшие в 2020 г. 1,403 и 7,900 мкг/кг было характерно для ПХБ 97. Аналогичное распределение конгенов ПХБ наблюдается и для почвенного покрова городской зоны. В почвенном покрове горной зоны относительная доля конгенера ПХБ 97 достигала 97-100%, в почвенном покрове территории г. Алматы от 64 до 100 %.

Важным вопросом является анализ конгенов ПХБ, обладающих более высокими токсичными свойствами, которыми являются строго контролируемые в природных объектах «маркерные» и диоксиноподобные изомеры.

Из приведенного в таблице 7 материала видно, что концентрация найденных диоксиноподобных и «маркерных» конгенов близки между собой и характеризуется значениями одного порядка. Абсолютное содержание «маркерных» конгенов было в интервале от 0,002 до 0,009 мкг/кг, а диоксиноподобных – от 0,002 до 0,005 мкг/кг.

Таблица 7 – Концентрация «маркерных» и диоксиноподобных конгенов в почве

Точки отбора проб	маркерные								диоксиноподобные							
	ПХБ 52		ПХБ 101		ПХБ 138		ПХБ 153		ПХБ 105		ПХБ 114		ПХБ 118			
	мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%		
6 точка					0,003	18	0,002	10								
12 точка					0,003	11										
15 точка							0,009	26								
17 точка			0,004	12									0,003	9		
19 точка			0,002	6	0,005	13	0,003	7					0,002	6		
25 точка					0,006	15	0,002	5	0,002	6						
30 точка			0,007	16	0,002	4					0,002	4				
32 точка	0,004	11					0,006	19								
35 точка																
37 точка	0,003	8			0,003	7	0,004	11					0,002	5		
39 точка									0,005	17			0,003	9		
48 точка	0,002	8	0,004	16			0,002	8								
50 точка					0,002	5	0,003	8	0,002	5	0,003	9	0,003	8		
52 точка	0,003	12			0,002	7	0,002	6								
53 точка					0,003	14										

Относительная доля «маркерных» конгенов ПХБ 52, 101, 138 и 153 менялась в основном в пределах от 4 до 26 %. Для диоксиноподобных конгенов ПХБ 105, 114, 118 этот показатель характеризовался значениями от 4 до 17 %.

Относительной особенностью динамики «маркерных» и диоксиноподобных изомеров в почвенных пробах, собранных в 2025 г. является то, что в них в частых случаях отсутствовали указанные типы конгенов. Например, «маркерные» конгенеры отсутствовали в пробах, отобранных на точках 39 и 35, а на последней вообще не обнаружены рассматриваемые виды конгенов. Диоксиноподобные конгенеры отсутствовали в 8 почвенных пробах, отобранных на точках 6, 12, 15, 32, 35 и 48, расположенных в равнинной и пустынной зонах, а на точках 52 и 53 из горных и урбанизированной территорий. За многолетний период наших исследований динамику ПХБ в природных водах, снежном и почвенных покровах территории Казахстана подобного режима токсиканта не встречали.

Таким образом, основными характерными особенностями режима ПХБ в образцах почв, собранных в 2025 г. являются следующие. Во-первых, низкая их концентрация (от 0,018 до 0,045 мкг/кг) по сравнению, например, с данными за 2024 г., когда концентрация токсиканта достигала в пробах почв из пустынной и равнинной зон 0,149 и 0,524 мкг/кг, из предгорной зоны до 0,637 и 0,142 мкг/кг, а из урбанизированных территории – до 1,130 и 1,631 мкг/кг. Во-вторых, низкая концентрация и частые случаи отсутствия в почвах высоко токсичных диоксиноподобных и «маркерных» конгенеров, а также преобладание в конгенерном составе легких, имеющих невысокую токсичность конгенеров. Все это в общей сложности дают, основание считать, что почвенный покров территорий области в изученный период отличался невысокой токсичностью по отношению к ПХБ.

Карты интенсивности загрязнения снежного покрова, почвы токсичными соединениями. Карты интенсивности загрязнения СП и почв области ТМ и ПХБ демонстрируют выраженную пространственную неоднородность, связанную как с природными условиями, так и с антропогенной нагрузкой (рисунки 8-21).

На исследуемой территории концентрации меди в СП демонстрируют четкую пространственную неоднородность, так, максимальные значения меди свыше 25,1 мкг/дм³ зафиксированы в районе г. Текели (точки 42-44 и 53). Высокие уровни меди также отмечаются в центральной части области, включая район г. Талдыкорган, где концентрации достигают 20,0-25,0 мкг/дм³, низкие значения меди 10,0 мкг/дм³, были характерны для северных и западных районов, где промышленное воздействие минимально (рисунок 8).

Содержание цинка относительно равномерно распределено по территории, однако на юге и юго-западе области, особенно близ г. Талдыкорган (точки 41, 42, 50, 51), наблюдаются высокие значения до 12,1 мкг/дм³, а низкие – 3,0 мкг/дм³ зафиксированы на севере (точки 1-4, 6, 8), что соответствует фоновым условиям (рисунок 9). Наибольшее загрязнение свинцом наблюдается на востоке в районе г. Текели (точка 53), также были характерны для юго-восточных районов, включая Жаркент (точки 42-44), где содержание достигает 19,0-23,0 мкг/дм³ а в западной части области концентрации свинца существенно ниже (3,0-6,0 мкг/дм³) (рисунок 10).

Концентрации кадмия варьируют от 0,001 до 7,2 мкг/дм³. Повышенные значения характерны для центральной части области, включая район с. Капал (точка 36), а также восточные и юго-восточные территории, такие как Сарканд и Жаркент. На севере, особенно на точках 1-6 и 11, наблюдаются низкие уровни 0,5 мкг/дм³ (рисунок 11). Распределение кобальта показывает, что более высокие значения отмечаются в южной части области, в районах Текели и Карабулака (точки 43, 44, 51, 52), тогда как в северо-восточных районах, ближе к оз. Балкаш, его содержание снижается (рисунок 12). Концентрации никеля достигают наибольших уровней в восточных и юго-восточных районах, включая Лепсинск и Жаркент, в то время как наиболее низкие значения зафиксированы в северо-западной части региона, где влияние источников загрязнения минимально (рисунок 13).

Концентрации металлов в почвах демонстрируют выраженные пространственные различия. Концентрации меди в почве варьируют от 0,009 до 0,035 мг/кг. Наибольшие значения (0,035 мг/кг) отмечены на востоке, в районе Жаркента (точка 30) и на севере вблизи Лепсы (точки 5-7), где фиксируются локальные очаги повышенного загрязнения. Средние значения меди сосредоточены в центральной части области, включая окрестности Талдыкоргана и Текели, с диапазоном 0,015-0,025 мг/кг, а низкие концентрации (0,01 мг/кг) были характерны для южной окраины и некоторых западных территорий (рисунок 14).

Цинк в почвах распространен довольно равномерно, однако высокие концентрации (0,06 мг/кг) наблюдаются в южной части области, особенно в районе Текели и Карабулака (точки 51 и 52), а также в восточной части (рисунок 15). Средние значения цинка до 0,021-0,04 мг/кг, были характерны для центральной части, включая г. Талдыкорган и прилегающие районы, а низкие значения (0,009 мг/кг) на севере и западе.

Концентрации свинца относительно низкие, но при этом пространственно неоднородны: высокие значения (0,009 мг/кг) локализуются в районе Текели (точки 43, 44

и 53), а также частично в юго-западных районах (рисунок 16). Средние значения (0,005-0,009 мг/кг) охватывают центральную зону, включая Талдыкорган, тогда как в северной и восточной частях области преобладают низкие уровни (0,003 мг/кг).

Содержание кадмия варьирует от 0,001 до 0,006 мг/кг, при этом наибольшие концентрации (0,006 мг/кг) зафиксированы в районе Текели (точки 43-44), где локализован устойчивый очаг загрязнения, совпадающий с промышленной зоной (рисунок 17). Восточные районы, в т.ч. Жаркент (точка 30), также демонстрируют повышенные уровни (0,004-0,006 мг/кг), тогда как северо-западные и западные территории характеризуются наименьшими значениями (0,002 мг/кг).

Кобальт в почвах области имеет диапазон концентраций от 0,014 до 0,026 мг/кг (рисунок 18). Наибольшие значения наблюдаются в северных районах, особенно на севере Лепсинского хребта и на западе (точки 5, 6, 8, 19), что, вероятно, связано с природными геохимическими аномалиями. Центральные и южные районы (Талдыкорган, Текели) демонстрируют более низкие концентрации (0,014-0,02 мг/кг).

Концентрации никеля варьируют от 0,009 до 0,019 мг/кг и выше (рисунок 19). Максимальные уровни зарегистрированы на востоке и юго-востоке области, особенно в точках 27-30, близ Жаркента и вдоль границы с Китаем. Средние значения характерны для центральной зоны, включая Талдыкорган, тогда как север и запад демонстрируют минимальные концентрации.

Таким образом, общее распределение металлов в почве демонстрирует значительное влияние как природных факторов, так и локального антропогенного загрязнения. Районы с наибольшими концентрациями: Текели, Жаркент, Лепсы, совпадают с промышленно активными зонами и потенциальными источниками загрязнения.

Карты содержания суммы ПХБ в СП и почвах демонстрируют выраженную пространственную неоднородность загрязнения, отражающую влияние как локальных источников техногенного происхождения, так и метеорологических факторов, способствующих переносу и осаждению токсичных соединений. Согласно данным рисунка 20, максимальные концентрации ПХБ в СП зафиксированы в южных, юго-восточных и восточных районах области, включая территории вблизи г. Текели (точка 53), населенного пункта Каркары и района г. Жаркент (точка 30). В этих зонах уровень загрязнения превышает 0,036 мкг/дм³, что свидетельствует о наличии устойчивых источников выбросов ПХБ, либо о переносе загрязненного атмосферного аэрозоля с близлежащих промышленных объектов. Значения от 0,0321 до 0,036 мкг/дм³ наблюдаются также в западных районах области (точки 32 и 48), а умеренные уровни (0,0281-0,032 мкг/дм³) регистрируются в центральной части, в том числе вблизи города Талдыкоргана. Минимальные концентрации ПХБ в СП (0,02 мкг/дм³) зафиксированы на северо-западе и частично на севере области, где уровень антропогенной нагрузки минимален.

Распределение ПХБ в почвах в целом повторяет структуру загрязнения СП, что указывает на возможную миграцию соединений с атмосферными осадками в поверхностные горизонты почвы. Наиболее высокие значения ПХБ (0,034 мкг/кг) зафиксированы в районах, подверженных техногенному воздействию: Текели (точка 53), Жаркент (точка 30), а также на участках в западной части области вблизи точек 19 и 32 (рисунок 21). Близлежащие территории, прилегающие к этим зонам, демонстрируют сходный уровень загрязнения (в пределах 0,031-0,034 мкг/кг), формируя устойчивые локальные очаги накопления. В центральной и северо-западной частях области, включая район г. Талдыкорган, содержание ПХБ варьирует в пределах 0,018-0,022 мкг/кг, что соответствует умеренному уровню загрязнения. Сходство пространственного распределения ПХБ в почвах и СП указывает на комплексное влияние атмосферного осаднения, а также долговременное накопление и фиксацию этих соединений в почвенном профиле, особенно в районах с исторически сложившимся промышленным или транспортным загрязнением. Такие территории требуют регулярного мониторинга в связи с возможным риском для окружающей среды и здоровья населения.

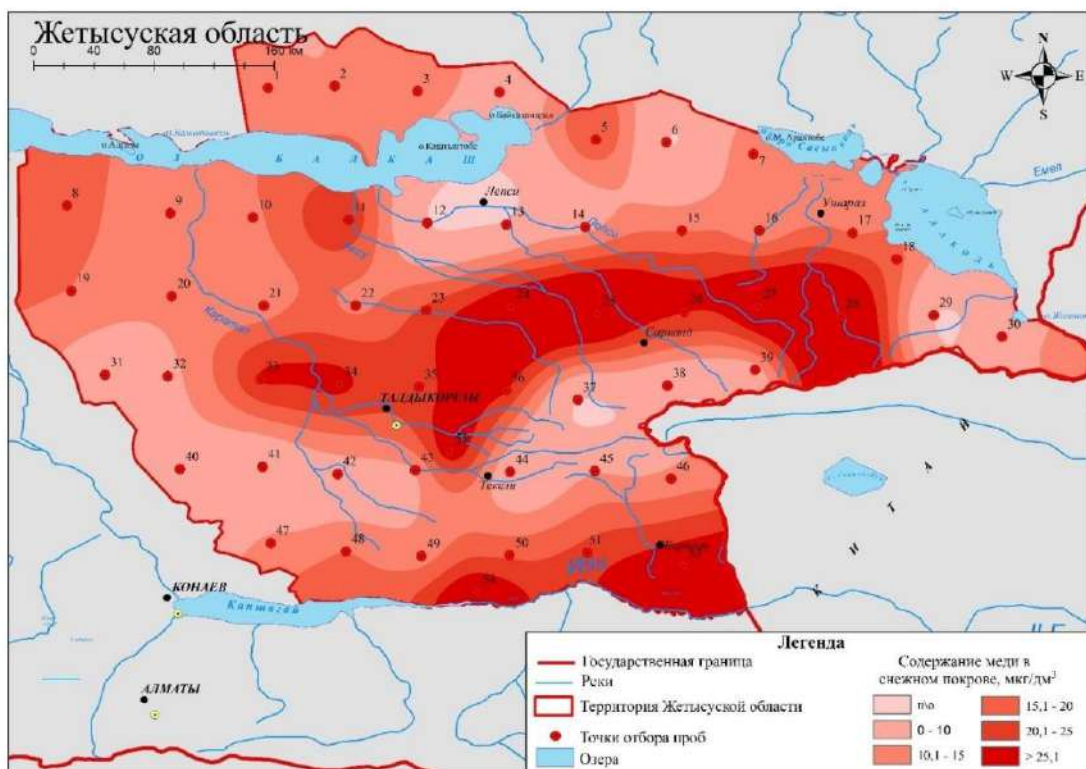


Рисунок 8 – Содержание меди в СП, мкг/дм^3

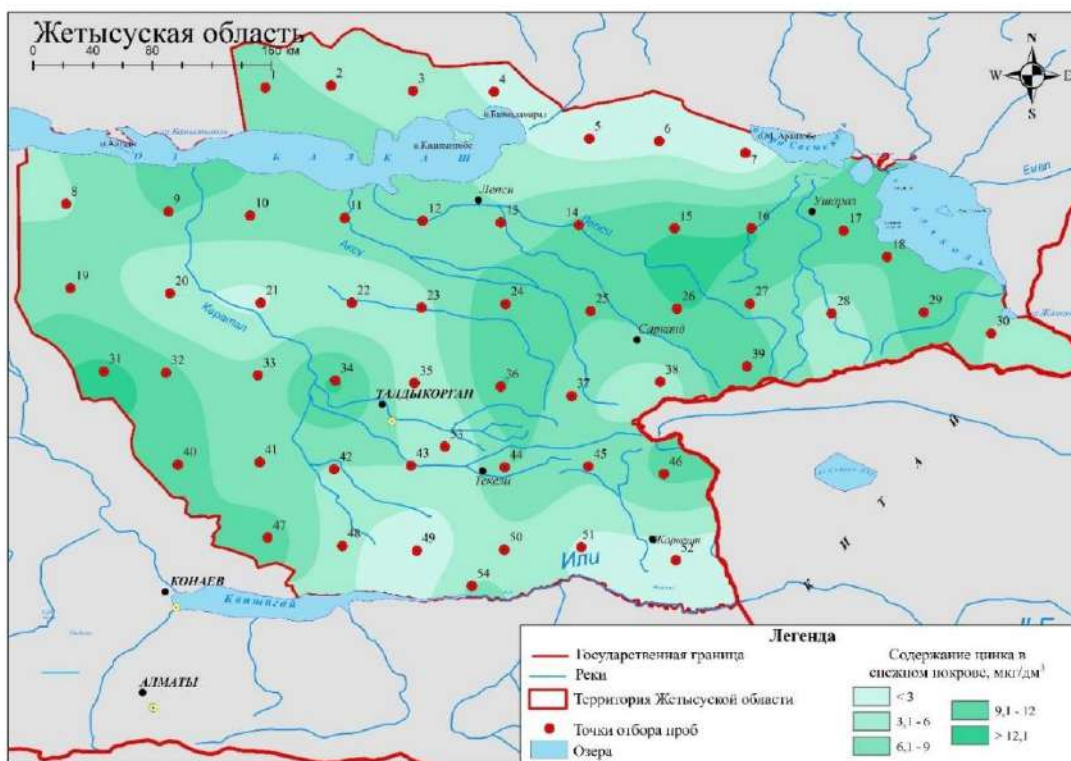


Рисунок 9 – Содержание цинка в СП, мкг/дм^3

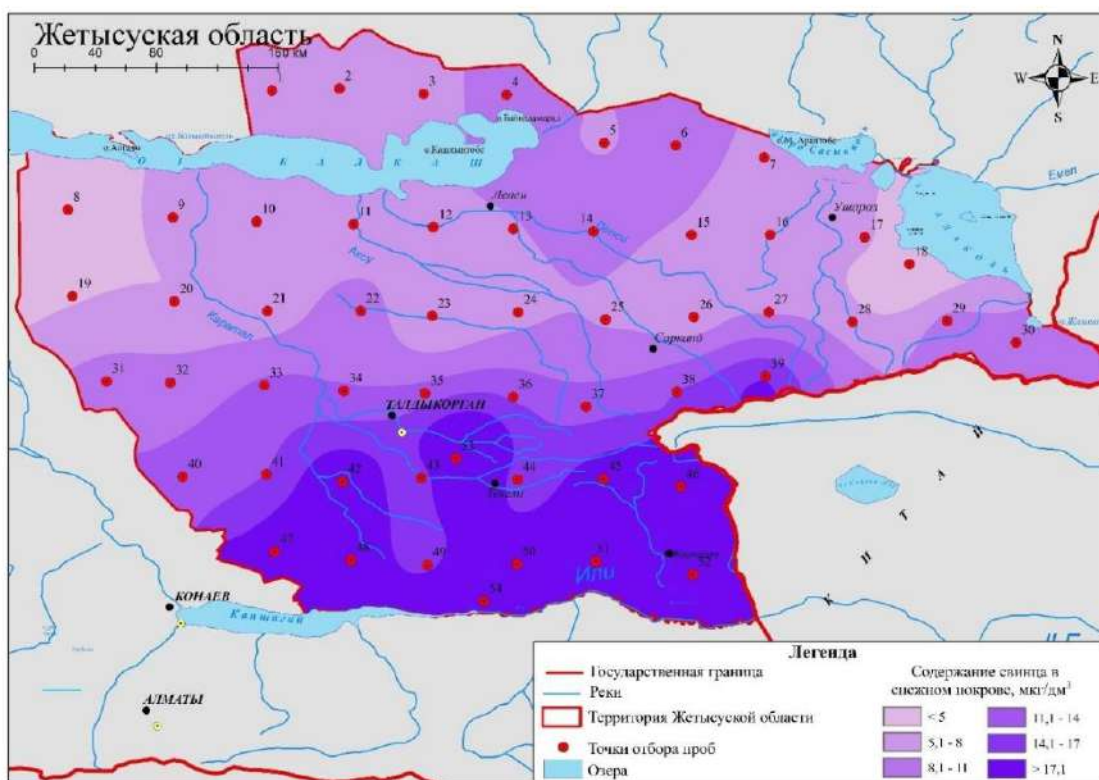


Рисунок 10 – Содержание свинца в СП, мкг/дм³

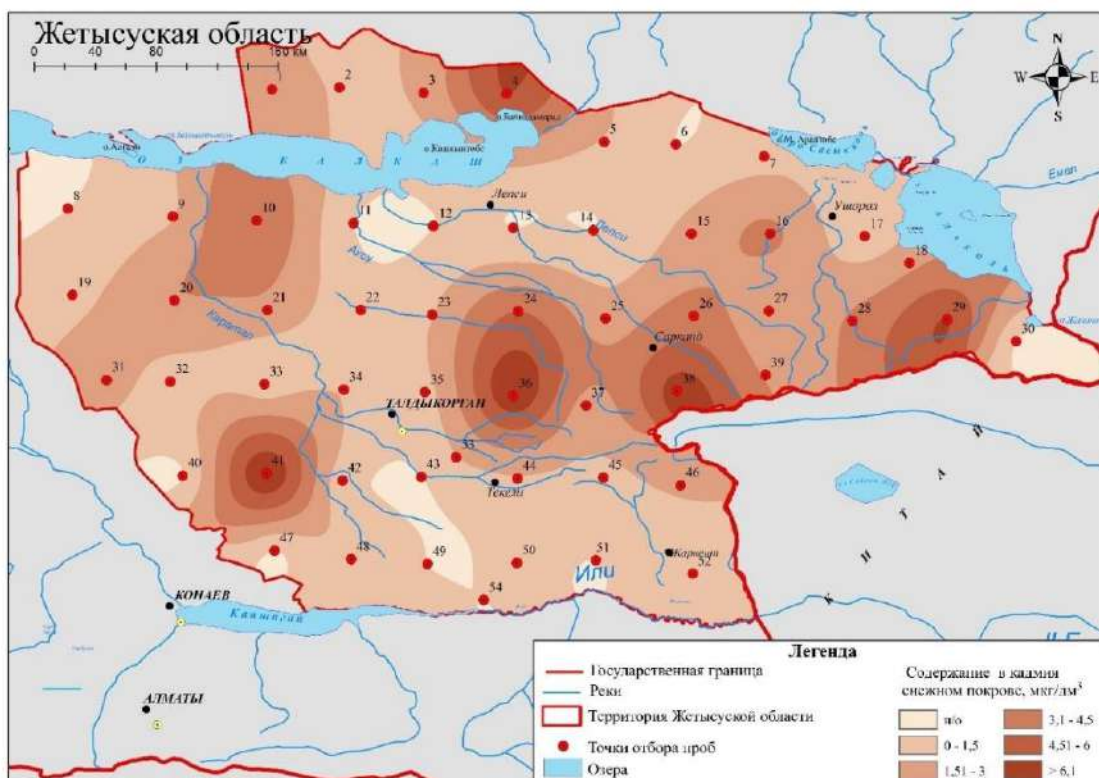


Рисунок 11 – Содержание кадмия в СП, мкг/дм³

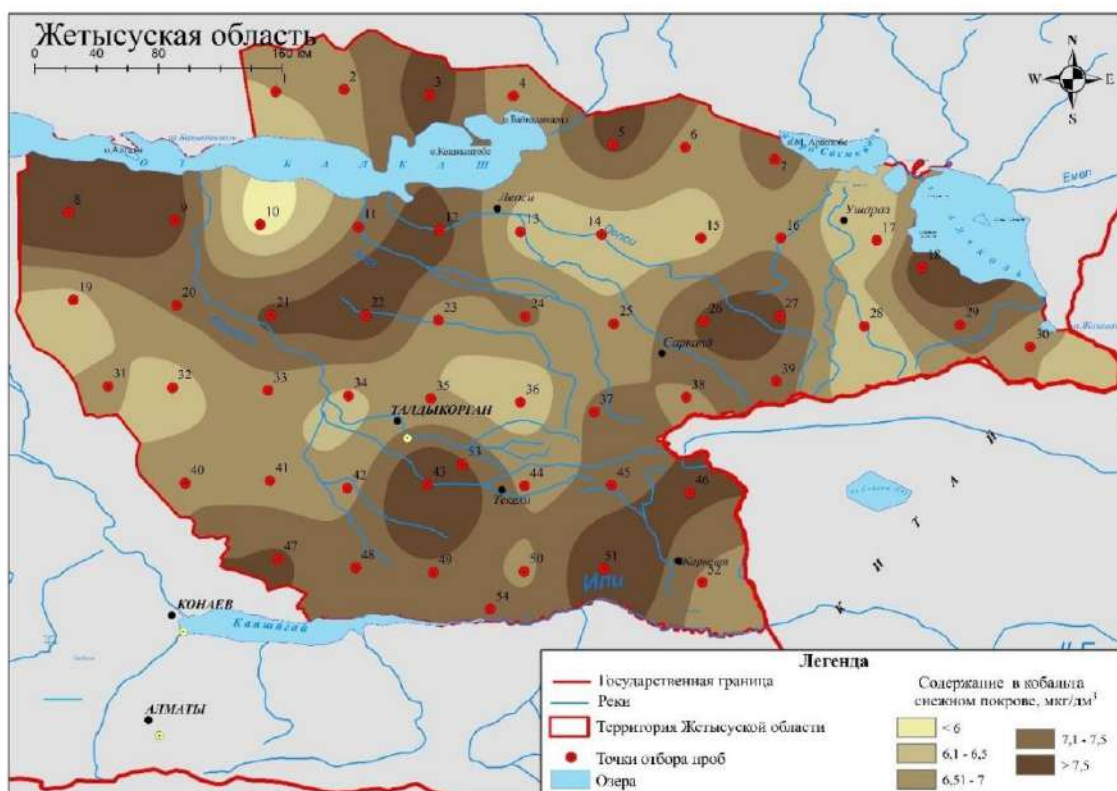


Рисунок 12 – Содержание кобальта в СП, мкг/дм³

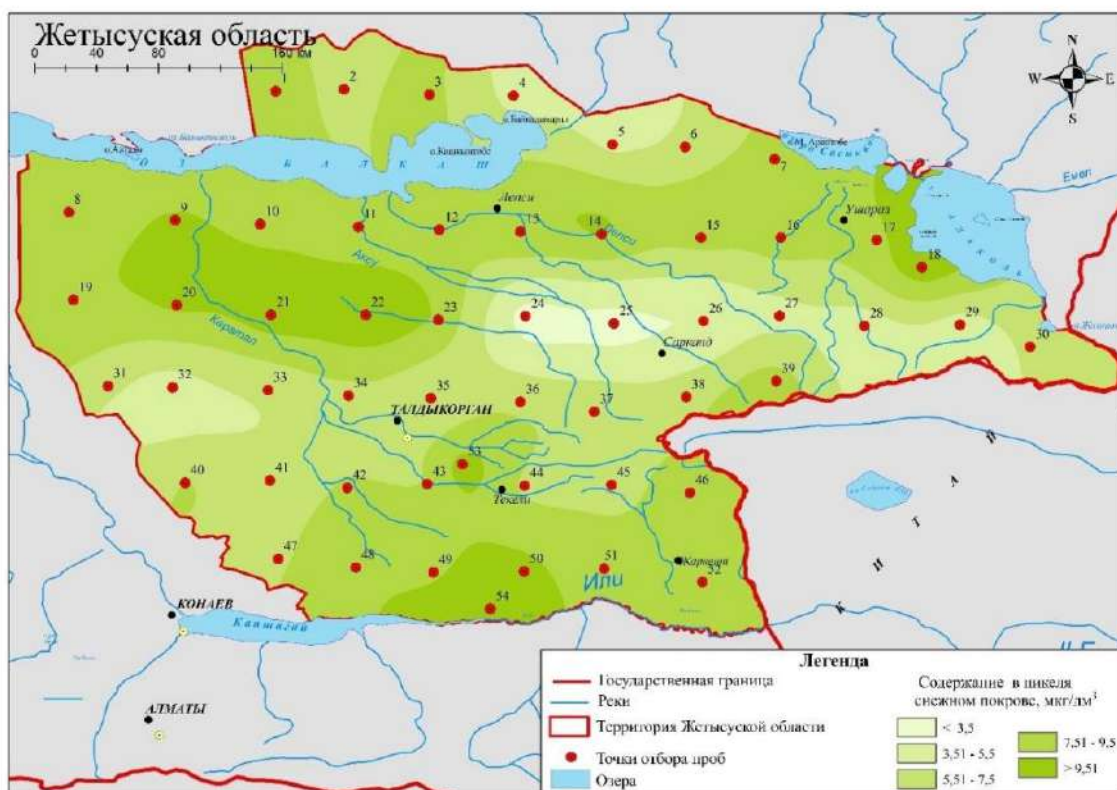


Рисунок 13 – Содержание никеля в СП, мкг/дм³

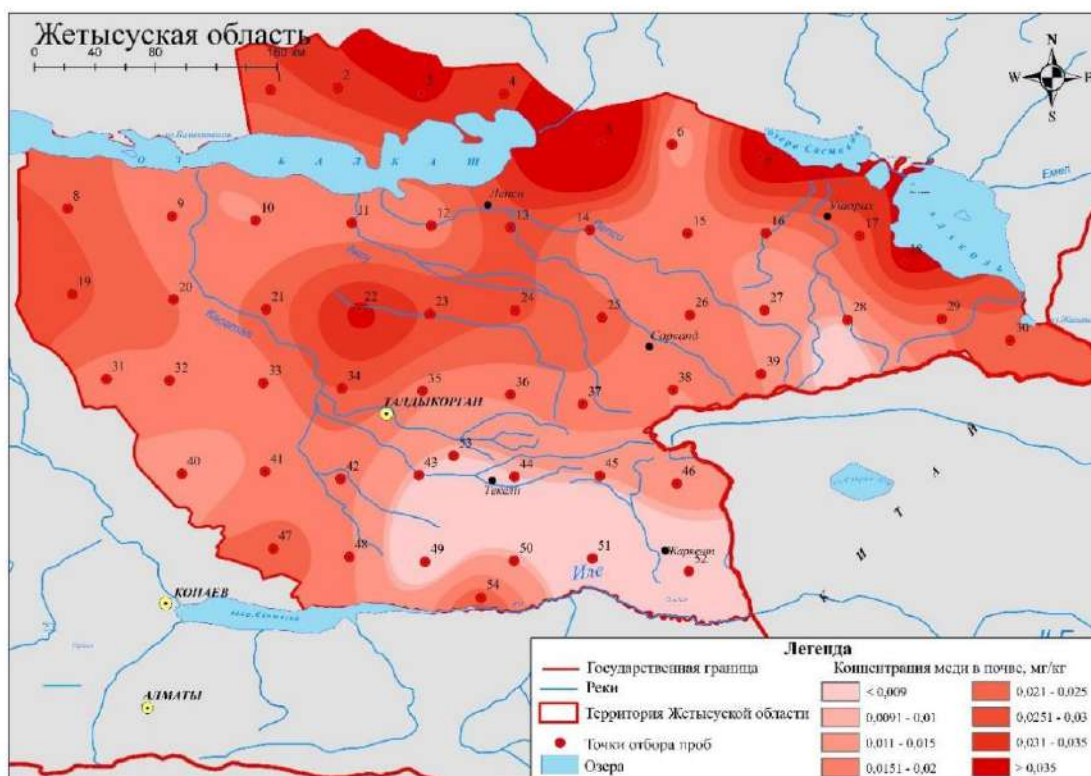


Рисунок 14 – Содержание меди в почве, мг/кг

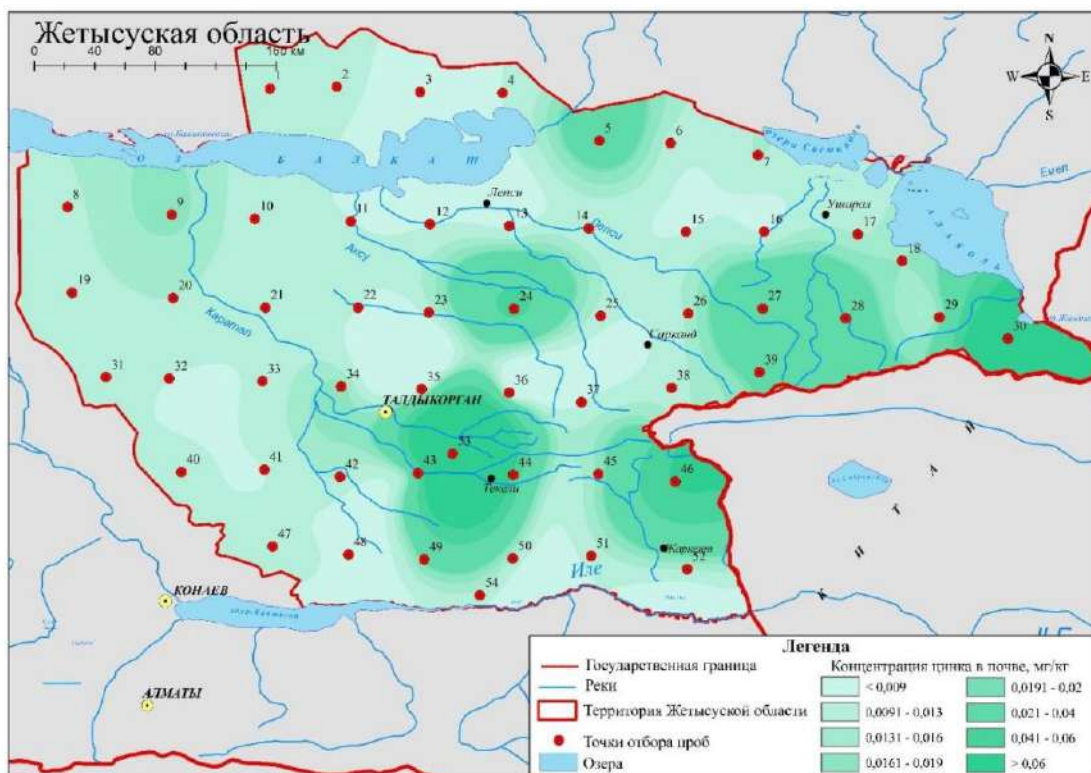


Рисунок 15 – Содержание цинка в почве, мг/кг

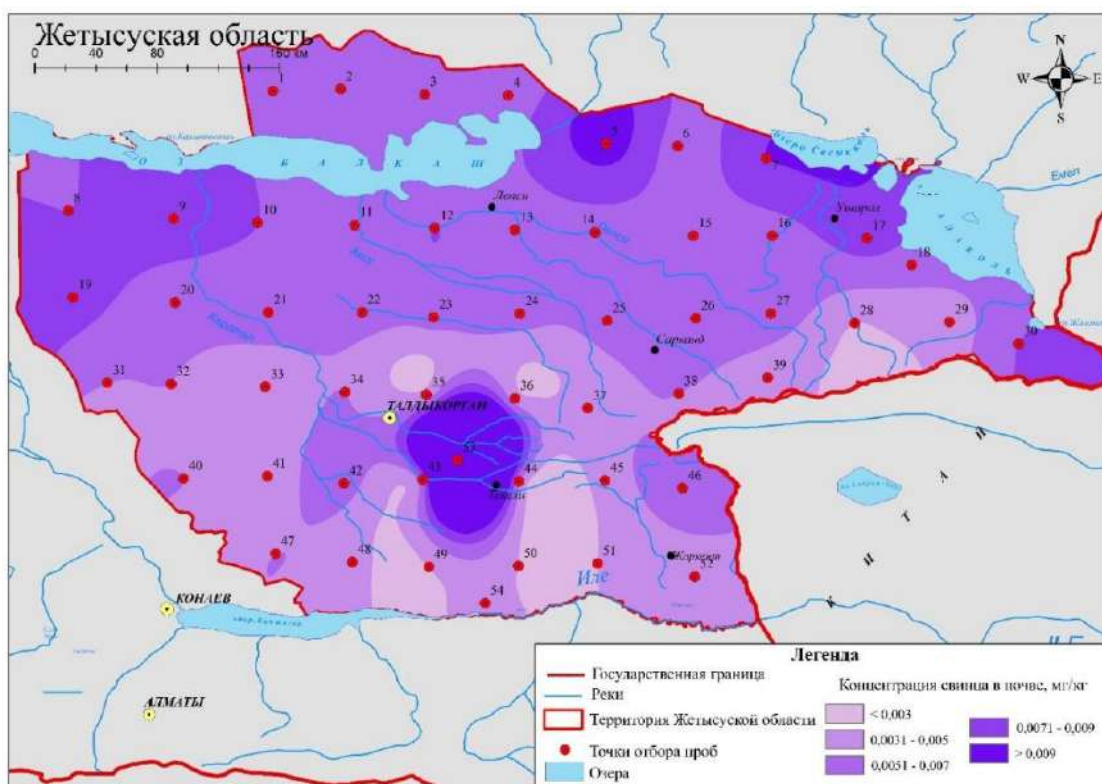


Рисунок 16 – Содержание свинца в почве, мг/кг

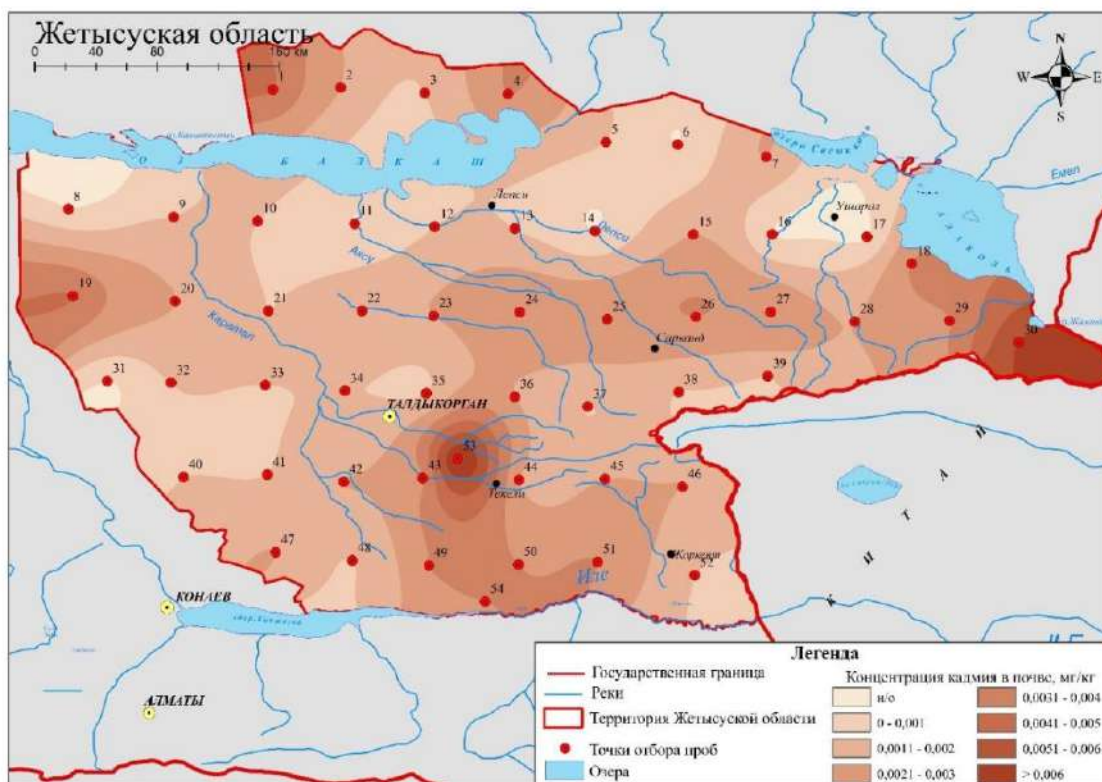


Рисунок 17 – Содержание кадмия в почве, мг/кг

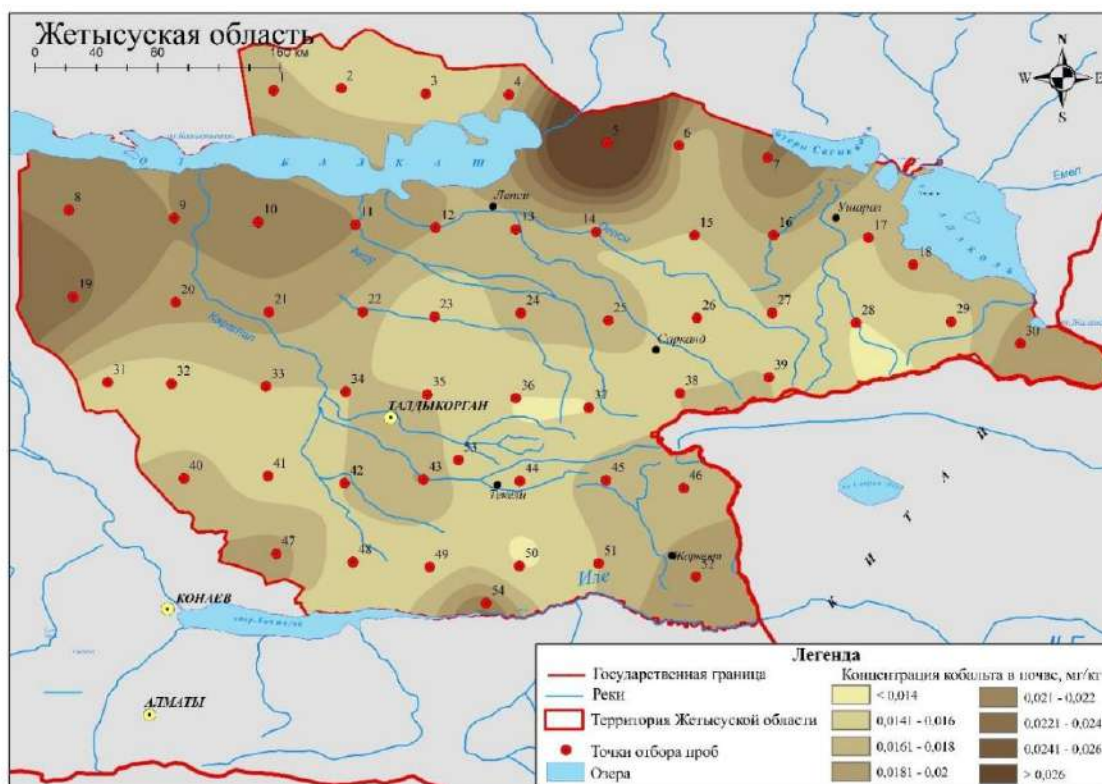


Рисунок 18 – Содержание кобальта в почве, мг/кг

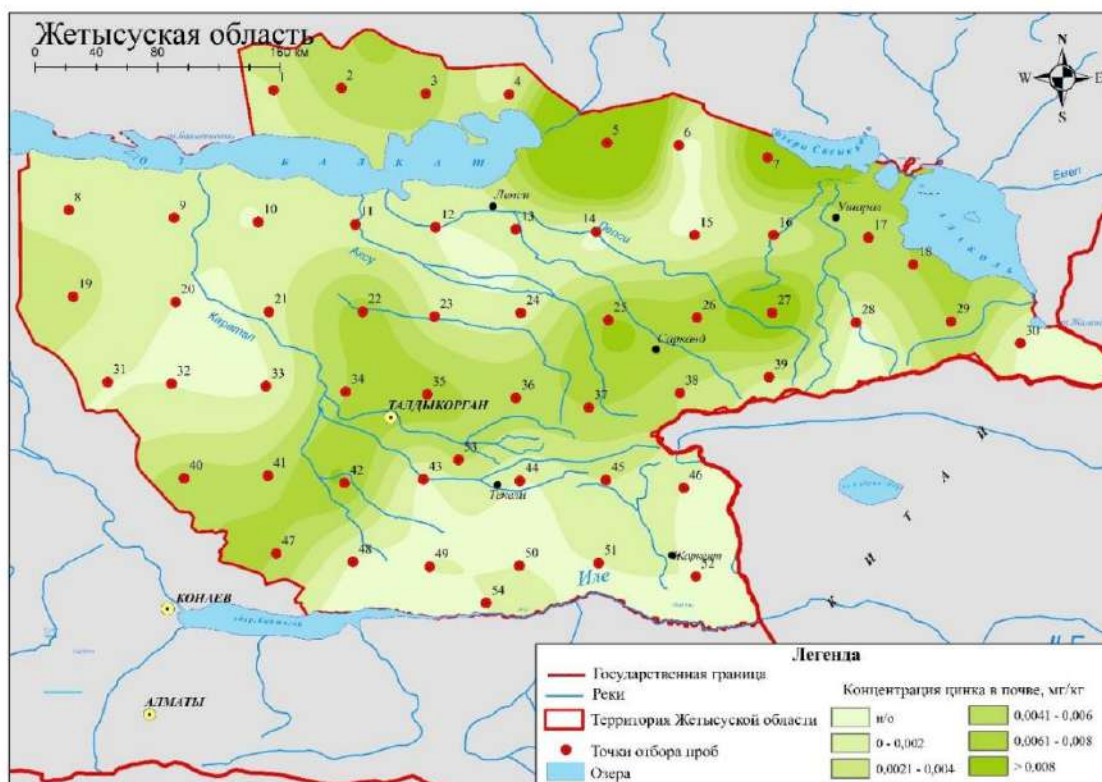


Рисунок 19 – Содержание никеля в почве, мг/кг

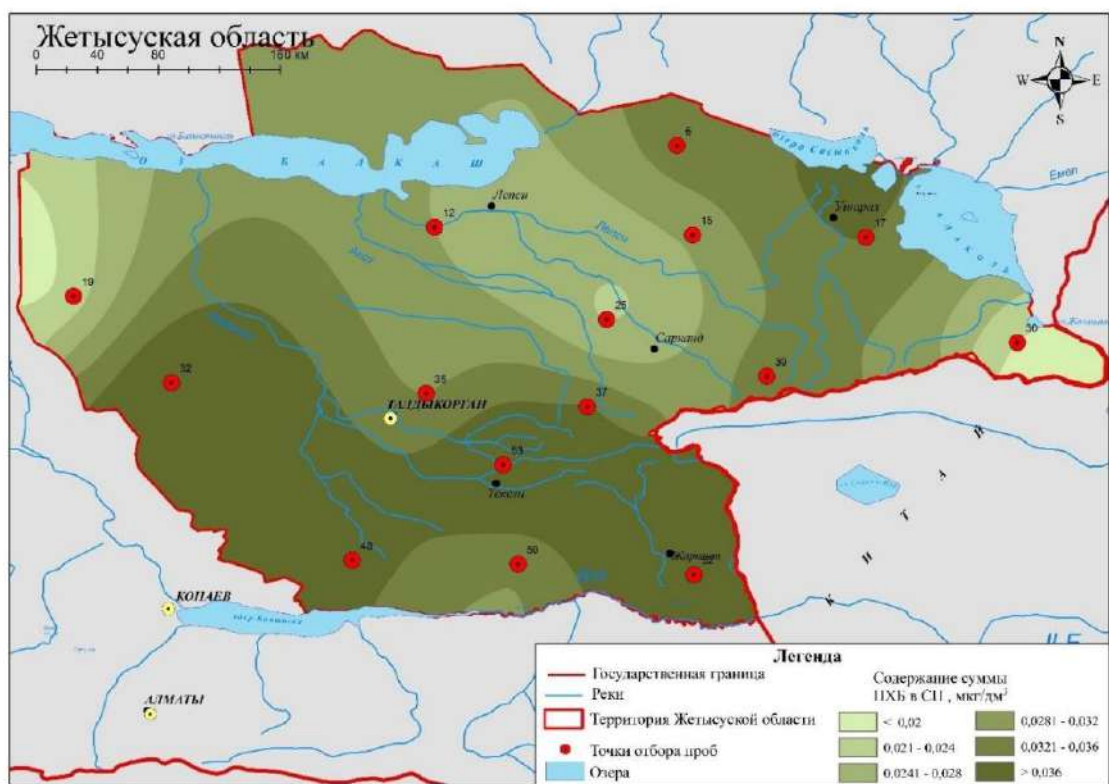


Рисунок 20 – Содержание суммы ПХБ в СП, мкг/дм³

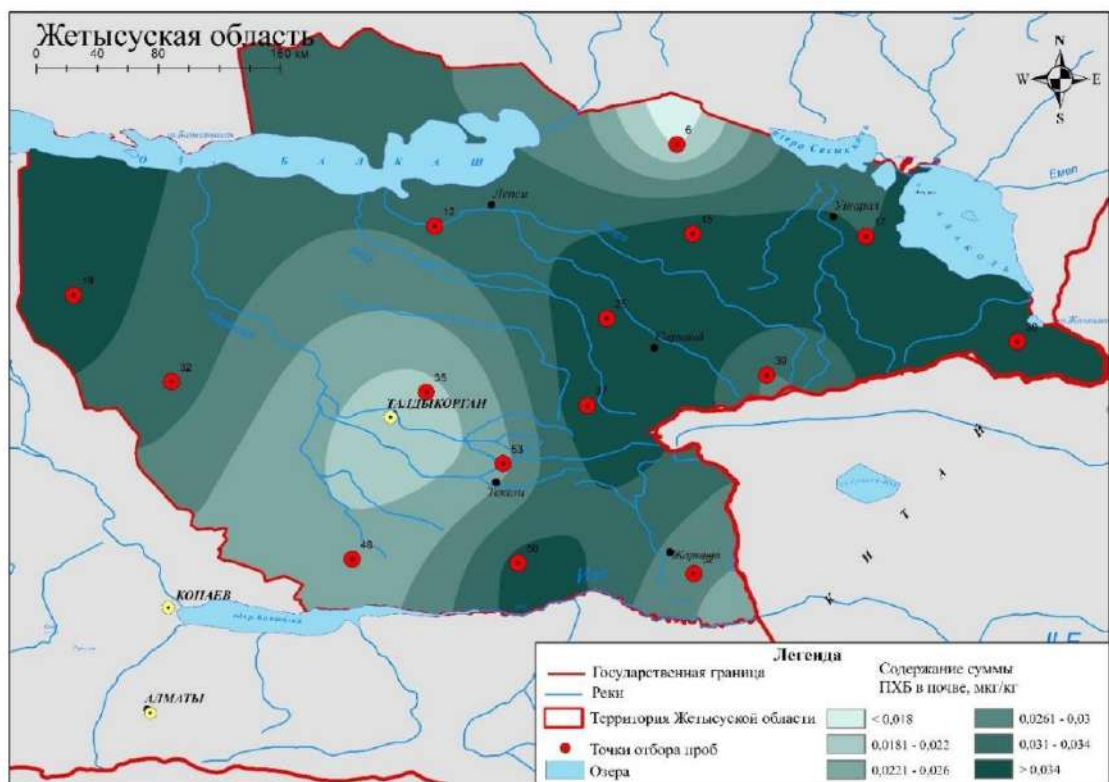


Рисунок 21 – Содержание суммы ПХБ в почве, мкг/кг

Анализ географического распределения концентраций выявил четкую дифференциацию территории на относительно чистые и загрязненные зоны. Минимальные содержания всех металлов характерны для горных и предгорных районов Жонгар Алатау, отдаленных от крупных источников загрязнения (условно фоновые точки в национальном парке «Жонгар-Алатауский», а также на северном побережье оз. Алаколь). Суммарный уровень ТМ не превышал 10,0-20,0 мкг/дм³, преобладают фоновые компоненты (цинка и меди) в следовых количествах, тогда как токсичные элементы (свинец, кадмий и никель) практически не были обнаружены. На равнинной части области наблюдается мозаичная картина загрязнения, связанная с локальными антропогенными воздействиями. Вокруг г. Талдыкорган формируется зона умеренного загрязнения: в радиусе 30 км от города концентрации свинца, цинка и меди в снеге в 2-3 раза выше фона. Вдоль основных автотрасс (в частности, трасса Алматы-Оскемен, проходящая через область) заметно повышение содержания цинка и меди в СП придорожных территорий, что можно объяснить выносом дорожной пыли и продуктов износа автомобильных шин и тормозов. Наибольшая нагрузка ТМ отмечена в восточной части региона, в зоне влияния г. Текели. Здесь зарегистрированы локальные «горячие точки» с экстремально высокими концентрациями: помимо вышеупомянутых максимумов по цинку, свинцу и кадмию, в ряде проб около г. Текели содержатся повышенные концентрации кобальта (6,0-8,0 мкг/дм³) и никеля (8,0-10,0 мкг/дм³), что может свидетельствовать о комплексном характере металлургического загрязнения (свинцово-цинковые руды Текели также содержали сопутствующие кобальта и никеля). Зона влияния техногенного аэрозоля от г. Текели прослеживается на расстоянии до 40-50 км к северо-востоку (по розе ветров преобладают западные и юго-западные направления зимой). В то же время к югу и востоку от г. Текели (подветренные склоны гор) концентрации в снеге быстро снижаются до фоновых, подтверждая роль горного рельефа как естественного барьера для распространения загрязняющих веществ.

Таким образом, пространственное распределение загрязняющих веществ в СП и почвах Жетысуской области характеризуется выраженной неоднородностью. Наибольшие концентрации ТМ: меди, свинца, кадмия, никеля, кобальта и цинка, выявлены в южных, восточных и центральных районах, в т.ч. в окрестностях гг. Текели, Жаркента, Капала и Лепсы, что указывает на влияние промышленных и горнорудных объектов. В то же время северные и западные части региона демонстрируют более низкие значения, что подтверждает локализованный характер загрязнения и влияние природных факторов, таких как рельеф и направления атмосферных потоков, на его распространение.

Аналогичная картина наблюдается и для ПХБ: более высокие уровни зафиксированы в южных, восточных и юго-западных районах, включая гг. Текели, Жаркент и район Каркары, в то время как в центральной, северной и северо-западной частях области концентрации значительно ниже. Совпадение пространственных структур загрязнения для неорганических и органических компонентов свидетельствует о систематическом поступлении загрязнителей из локальных источников и подтверждает их накопление в компонентах природной среды.

2.3 Оценка экологической устойчивости по интегральным индексам загрязнения и экологического риска

Количество поступлений загрязняющих веществ на единицу площади подстилающей поверхности. В условиях Жетысуской области, характеризующейся сочетанием горных и равнинных территорий, СП играет ключевую роль в процессах аккумуляции и последующего переноса загрязняющих веществ. Поступление ТМ с атмосферными осадками является одним из основных путей их проникновения в наземные экосистемы. Зимний сезон, сопровождающийся формированием устойчивого СП, позволяет интегрально оценить уровень техногенной нагрузки на регион, так как в снежной толще аккумулируются все атмосферные выпадения за холодный период. Такой подход дает возможность проследить пространственные закономерности распределения загрязняющих веществ и выявить зоны с повышенным риском экологической нагрузки.

Количество поступлений загрязняющих веществ на единицу площади подстилающей поверхности в пределах Жетысуской области отражает комплексное воздействие как локальных, так и региональных источников эмиссий, формируя пространственно неоднородную картину загрязнения [26-32]. Снежный покров, выступающий временным фильтром атмосферы, позволяет количественно оценить нагрузку за зимний сезон и выделить основные закономерности накопления металлов. Для расчета использовалась зависимость, рассчитанная по формуле (1), учитывающая плотность СП, толщину слоя и измеренные концентрации загрязняющих веществ, что позволяет перевести массовое содержание компонентов в объем атмосферных выпадений на единицу площади [33]. Такой подход обеспечивает более точную оценку сезонной нагрузки на экосистемы и дает возможность выявить территории с максимальным уровнем техногенного воздействия:

$$Q = Ci \cdot M \quad (1)$$

где, Q – количество поступившего вещества, мкг/м²;

Ci – концентрация загрязняющего вещества в талой воде, мкг/дм³;

M – масса снега на площади 1 м², кг/м² (принято, что 1 кг ≈ 1 дм³).

Данный показатель позволяет не только оценить интенсивность загрязнения по отдельным элементам, но и установить связь между объемом СП и степенью накопления токсикантов. Включение этого расчета в систему анализа создает основу для сравнительной оценки экосистемной устойчивости территории, а также дает возможность выделить критические зоны, в которых воздействие атмосферных выбросов наиболее выражено.

Расчеты показали, что в среднем за сезон на 1 м² поверхности выпадает 3,7 мг меди, 1,7 мг цинка, 2,6 мг свинца, 0,5 мг кадмия, 1,7 мг кобальта и 1,6 мг никеля (рисунок 22).

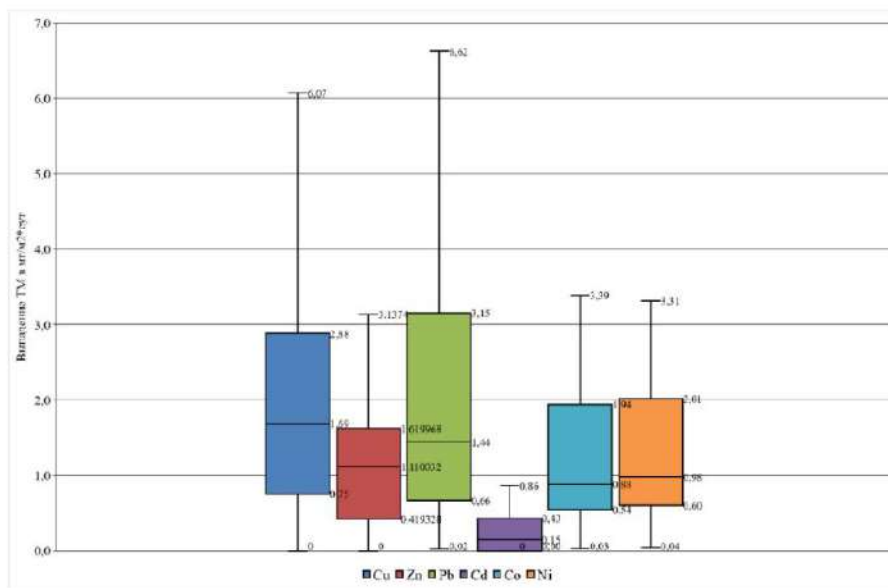


Рисунок 22 – Статистическое распределение (box-plot) выпадений ТМ в СП, мг/м²·сут

Полученные данные свидетельствуют о том, что наибольшую массовую долю среди исследуемых металлов формируют медь и свинец, при этом никель и кобальт также вносят значительный вклад в общий фон загрязнения. Кадмий отличается наиболее низкими абсолютными значениями выпадений, однако с учетом его высокой токсичности и мобильности в природных средах, он остается важным элементом оценки экологического риска.

Диапазоны колебаний по отдельным металлам отражают высокую пространственную контрастность. Так, предельные значения выпадений достигали 6,6 мг/м²·сут для свинца, 6,1 мг/м²·сут для меди, 3,4 мг/м²·сут для кобальта, 3,3 мг/м²·сут для никеля и около 3,1 мг/м²·сут для цинка. Хотя для кадмия экстремальные значения существенно ниже (до 0,86 мг/м²·сут), его локальные накопления также требуют внимания. Такие пиковые значения связаны с конкретными точками (27, 28, 39, 53), приуроченными к районам активного техногенного воздействия и особенностям атмосферной циркуляции.

Распределение выпадений ТМ отличается выраженной мозаичностью. Повышенные значения характерны для южной и юго-восточной частей региона, особенно вблизи промышленных центров (Текели, Жаркент), а также в песчаных районах Сарыесик-Атырау, где вероятен дальний перенос загрязненных частиц. В горных и предгорных зонах наблюдается высокая вариабельность: от практически фоновых значений до локальных аномалий, сосредоточенных вблизи транспортных узлов и населенных пунктов. В совокупности, пространственное распределение указывает на влияние как локальных источников выбросов, так и процессов дальнего атмосферного переноса.

Интегральные расчеты сезонных выпадений ТМ на территории Жетысуской области позволяют оценить масштаб техногенной нагрузки на регион. В пересчете на площадь области (118,5 тыс. км²) суммарное поступление за зимний период составило 422,4 тонны меди, 308,2 тонны свинца, 203,1 тонны цинка, 197,8 тонны кобальта, 191,0 тонны никеля и 63,7 тонны кадмия. Наибольший вклад в общее загрязнение принадлежит меди до 30 % от общего объема выпадений металлов. Существенную долю также составляют свинец, цинк, кобальт и никель, каждый из которых вносит от 13 до 22 % в общий поток загрязняющих веществ. Кадмий, несмотря на меньшую массу, остается приоритетным с точки зрения экологического риска из-за высокой токсичности, способности мигрировать в окружающую среду и накапливаться в живых организмах.

Продолжающаяся фиксация меди и свинца в составе СП свидетельствует о наличии активных источников выбросов, прежде всего, автотранспорт, горно-металлургические предприятия и зоны сноса устаревших промышленных объектов.

Экологическая интерпретация данных подчеркивает, что выпадения на единицу площади оказывают разное воздействие в зависимости от характеристик подстилающей поверхности. В песчаных почвах, распространенных на юге области, высокая проницаемость и слабая сорбционная активность способствуют миграции металлов в глубинные горизонты почвенного профиля и в подземные воды, увеличивая риск вторичного загрязнения гидросферы. В отличие от этого, тяжелые суглинки и глинистые почвы, типичные для северных, предгорных и восточных районов, обладают способностью к удержанию загрязнителей в верхнем слое, что приводит к формированию устойчивых техногенных аномалий.

Важную роль в пространственном распределении выпадений играют природно-климатические условия. Преобладающие направления ветров, барьерный эффект горных массивов и характер циркуляции воздуха формируют мозаичную структуру загрязнения: в зонах с активным ветровым переносом наблюдаются повышенные концентрации, тогда как в межгорных котловинах происходит осаждение более тяжелых частиц. Различия по высотам над уровнем моря также влияют на характер выпадений, в равнинных участках загрязняющие вещества распределяются относительно равномерно, в то время как в горных районах фиксируются локальные зоны с пиками и провалами концентраций.

Таким образом, масштаб и характер поступления ТМ на территорию Жетысуской области обусловлены сложным взаимодействием техногенных выбросов и природных факторов среды. Снежный покров, аккумулирующий атмосферные выпадения за весь зимний сезон, выступает высокочувствительным индикатором этих процессов. Полученные оценки позволяют не только зафиксировать текущие уровни нагрузки, но и выделить приоритетные территории для экологического контроля. Ведущими по массе загрязнения выступают медь, свинец и цинк как основные элементы массопереноса, тогда

как кадмий, несмотря на сравнительно низкие концентрации, представляет собой наибольшую опасность с точки зрения токсичности и биологической активности.

Интегральная оценка загрязнения по коэффициентам суммарного загрязнения. Интегральная оценка загрязнения природных сред требует применения показателей, отражающих совокупное воздействие нескольких элементов на окружающую среду. Одним из таких инструментов служит коэффициент суммарного загрязнения (K_c , Z_c), рассчитываемый как сумма коэффициентов концентрации для совокупности элементов [34]. Показатель отражает общий уровень химической нагрузки, не учитывая различий в токсичности между металлами.

В условиях Жетысуской области, где СП представляет собой временное депо атмосферных выпадений, а почвы долговременный аккумулятор загрязнителей, использование показателя Z_c становится важным дополнением к другим методам анализа. Сопоставление значений K_c и Z_c , рассчитанных по данным СП и почв, дает возможность выявить участки с комплексным загрязнением, проследить пространственные закономерности накопления ТМ и определить приоритетные зоны экологического риска. Таким образом, включение интегрального показателя загрязнения в систему экологического анализа позволяет комплексно охарактеризовать уровень химического воздействия на природные среды и значительно повышает информативность оценки состояния окружающей среды.

Следует учитывать, что фоновый подход к оценке загрязненности СП обладает рядом методологических ограничений [35]. Участки для отбора фоновых проб зачастую определяются субъективно, а сами значения фоновых концентраций подвержены вариациям, связанным с погодными условиями и сезонностью, поскольку СП полностью обновляется каждый год. Несмотря на это, расчеты коэффициентов загрязнения (K_c и Z_c) как для снега, так и для почв показали сопоставимость результатов и позволили установить связь между краткосрочной атмосферной нагрузкой и ее последующим накоплением в почвенной среде.

Расчет суммарного показателя загрязнения по почве и СП проводили по следующим формулам (2), (3):

$$K_c = \frac{C_i}{C_{\phi}} \quad (2)$$

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1) \quad (3)$$

где, K_c – коэффициент концентрации загрязняющего вещества;

C_i – концентрация загрязняющего вещества;

C_{ϕ} – концентрация загрязняющего вещества в фоновой точке;

n – число определяемых элементов.

На основе полученных суммарных показателей загрязнения почв и снега были оценены согласно оценочным шкалам [36-38] (таблица 8).

Таблица 8 – Уровни загрязнения СП (Z_c) и почв (Z_c) металлами

Уровень	Суммарный показатель загрязнения СП	Суммарный показатель загрязнения почв
низкий	32-64	8-16
средний	64-128	16-32
высокий	128-256	32-128
очень высокий	> 256	> 128

Оценка опасности загрязнения снега и почвы ТМ по соответствующим показателям, отражающим дифференциацию загрязнения области, проводилась по ориентировочным оценочным шкалам [36-39] (таблицы 9,10).

Таблица 9 – Ориентировочная оценочная шкала опасности загрязнения СП по суммарному показателю загрязнения (Z_c)

Уровень	Суммарный показатель загрязнения СП (Z_c)	Категории загрязнения СП
низкий	32-64	неопасный
средний	64-128	умеренно опасный
высокий	128-256	опасный
очень высокий	> 256	чрезвычайно опасный

Таблица 10 – Ориентировочная оценочная шкала опасности загрязнения почв по суммарному показателю загрязнения (Z_c)

Величина Z_c	Уровень	Категории загрязнения почв	Изменения показателей здоровья населения в очагах загрязнения
менее 16	низкий	допустимый	наиболее низкий уровень заболеваемости детей и минимальная частота встречаемости функциональных отклонений
16-32	средний	умеренно опасный	увеличение общей заболеваемости
32-128	высокий	опасный	увеличение общей заболеваемости, числа часто болеющих детей, детей с хроническими заболеваниями, нарушениями функционального состояния сердечно-сосудистой системы
более 128	очень высокий	чрезвычайно опасный	увеличение заболеваемости детского населения, нарушение репродуктивной функции женщин

Анализ рассчитанных коэффициентов суммарного загрязнения (Z_c) СП выявил значительную экологическую нагрузку в большинстве исследованных точек. Из 54 образцов лишь 5 (10 %) продемонстрировали «низкий» уровень загрязнения ($Z_c < 64$). В 11 пробах (20 %) значения находятся в диапазоне 64-128, что соответствует категории «умеренно опасного» загрязнения. Значения Z_c от 128 до 256, отражающие высокий уровень загрязнения, зафиксированы в 21 точке (40 %). Наиболее тревожную категорию «чрезвычайно высокий» уровень загрязнения ($Z_c > 256$) составляют 14 точек, или около 27 % от общего количества. Максимальные значения зарегистрированы на точках 24-28 и 51-54, где Z_c превышает 300-350, достигая пика в 410 (точка 54). В то же время в ряде точек отмечены минимальные значения (точка 6 $Z_c = 17$, точка 12 $Z_c = 34$), что также подчеркивает пространственную мозаичность загрязнения.

Повышенные значения интегрального индекса в снегу в основном обусловлены высокими коэффициентами концентрации по меди, кадмию, свинцу и цинку. Особенно высокие значения K_c зафиксированы для меди (373) и кадмия (36), в то время как показатели для свинца и цинка не превышают 24 и 16 соответственно. Такие характеристики типичны для районов, подверженных интенсивным аэрозольным выбросам техногенного происхождения.

В отличие от СП, почвы региона демонстрируют в основном «низкий» уровень загрязнения. В 77 % образцах суммарный показатель Z_c составляет менее 16, что соответствует допустимой категории. В 11 пробах значения находятся в пределах 16-32 «умеренно опасный» уровень загрязнения, только в двух точках (5 и 53) показатели находятся в диапазоне 32-128, что соответствует «высокому уровню» загрязнения. Значения выше 128 «уровня чрезвычайной опасности» не зафиксированы. Максимальные значения Z_c в почвах составляют около 50-60.

Таким образом, СП области в зимний период подвергается значительной техногенной нагрузке, нередко достигающей «высоких» и «чрезвычайно высоких» уровней

по интегральному показателю. Основным механизмом формирования загрязнения выступают атмосферные выбросы локального и регионального масштаба. Почвенные образцы, напротив, преимущественно отражают фоновые условия, аккумулируя загрязнители в пределах «умеренно опасных» уровней. Локальное превышение этих значений наблюдается лишь в отдельных точках, где прослеживаются локальные аномалии. Подобное расхождение в уровнях загрязнения указывает на сезонный характер снежных выпадений, тогда как почвы отражают долгосрочную аккумуляцию и более стабильные экологические условия.

Расчеты потенциального экологического риска по методу Хакансона и индекса геоаккумуляции. Оценка экологической устойчивости территории Жетысуской области требует не только анализа содержания токсикантов в снежном и почвенном покрове, но и применения интегральных индикаторов риска, которые позволяют количественно определить степень угрозы для экосистем. Для этого используются методы, сопоставляющие фактические концентрации ТМ с фоновыми значениями и нормативами, а также учитывающие токсикологические свойства элементов.

Метод Хакансона (*Potential Ecological Risk Index*) широко применяется в мировой практике для оценки потенциального экологического риска [40]. Его применение позволяет не только выявить локальные очаги загрязнения, но и определить суммарную нагрузку на экосистемы, интегрируя вклад каждого элемента с учетом его токсичности.

Для дополнительной характеристики уровня загрязнения используется индекс геоаккумуляции (*Igeo*), основанный на сравнении фактических концентраций металлов с геохимическим фоном [41-43]. Он дает возможность классифицировать почвы и снежный покров по уровням загрязнения – от фоновых значений до экстремально высоких нагрузок.

Совместное применение метода Хакансона и индекса *Igeo* обеспечивает комплексный подход к оценке экологического состояния региона, что позволяет определить критические зоны экологического риска, выделить территории с различной степенью техногенной нагрузки и более обоснованно судить о степени устойчивости экосистем Жетысуской области. В рамках данного подхода на первом этапе рассчитывается коэффициент загрязнения (C_f) по формуле (4):

$$C_{fi} = \frac{C_i}{C_{fon}} \quad (4)$$

где C_i – фактическая концентрация элемента в исследуемой пробе, а C_{fon} – фоновая концентрация данного элемента (для СП и почв использованы минимальные региональные значения).

На втором этапе по формуле (5) определяется индивидуальный индекс экологического риска (E_r)

$$E_{ri} = C_{fi} \cdot T_i \quad (5)$$

где T_i – токсикологический коэффициент (коэффициент токсичности) элемента, отражающий его потенциальную опасность для экосистем. В расчетах используются значения, предложенные Хакансоном и адаптированные для почвенно-гидрохимических исследований: Cd = 30, Pb = 5, Cu = 5, Ni = 5, Co = 5, Cr = 2, Zn = 1, Mn = 1.

Суммарный показатель экологического риска (R_I) вычисляется по формуле (6) как сумма всех индивидуальных рисков:

$$R_I = \sum E_{ri} \quad (6)$$

Классификация по Хакансону была оценена по градации суммарного риска (таблица 11).

Таблица 11 – Градация суммарного риска (*RI*)

<i>RI</i> (значение)	Категория риска
<150	низкий
150-300	умеренный
300-600	высокий
≥600	чрезвычайно высокий

Для сопоставления полученных данных по СП почве, был рассчитан индекс геоаккумуляции (*Igeo*), предложенный Мюллером (таблица 12), который также используется для оценки степени загрязнения донных отложений (почв) по сравнению с геохимическим фоном. Индекс вычисляется по формуле:

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{Ci}{1,5 \cdot C_{fon}}\right)$$

где *Ci* – фактическая концентрация элемента, *C_{fon}* – его фоновая концентрация, коэффициент 1,5 учитывает возможные колебания фонового уровня, связанные с литогенными особенностями и естественной вариабельностью состава.

Таблица 12 – Классификация по индексу геоаккумуляции (*Igeo*, по Мюллеру)

<i>Igeo</i> (значение)	Степень загрязнения
≤0	отсутствие загрязнения
0-1	слабое
1-2	умеренное
2-3	среднее
3-4	сильное
4-5	очень сильное
>5	чрезвычайно сильное

Таким образом, сочетание метода Хакансона и индекса *Igeo* обеспечивает комплексный подход: первый позволяет оценить потенциальный экологический риск с учетом токсичности металлов, второй – степень геохимического обогащения и пространственную вариабельность накопления поллютантов.

Анализ рассчитанных коэффициентов загрязнения (*Cf*), индивидуальных индексов риска (*Er*) и интегрального индекса экологического риска (*RI*) для СП и почв показал сложную и разнонаправленную картину пространственного распределения ТМ, отражающую различия в механизмах их поступления и накопления в природных средах.

В СП значения *Cf* для меди и цинка оказались низкими 0,04 и 0,003 соответственно, что свидетельствует о слабой кратковременной сезонной нагрузке этими элементами на момент отбора проб, что обусловлено, вероятно, их меньшей подвижностью в атмосферной фазе. Однако данный факт не исключает их значимости в экологическом контексте, поскольку в почвах меди и цинку соответствуют значительно более высокие значения, что указывает на их накопление во времени. Таким образом, вклад меди и цинка в формирование потенциального риска по СП является ограниченным, но они играют важную роль в долговременной техногенной нагрузке, особенно в почвенной среде.

Наибольший вклад в экологический риск в СП вносят свинец, кадмий и никель. Их коэффициенты загрязнения составили: *Cf(Pb)* = 24, *Cf(Cd)* = 7,2 и *Cf(Ni)* = 11. Соответственно, индивидуальные значения *Er* достигали 120 для свинца, 210 для кадмия и 55 для никеля, что отражает высокую токсичность и значительное превышение фоновых уровней. Интегральный индекс риска (*RI*) по снегу варьировал от 40 до 306, при среднем значении около 134, что соответствует в целом «низкому» и «умеренному» уровню риска, однако в отдельных точках (ст. Каратас – точка 5, с. Коктума – точка 18, с. Жасталап – точка 21 и г. Текели – точка 53) были зафиксированы «высокие» значения, указывающие на наличие локальных источников атмосферного загрязнения, вероятно, связанных с промышленными выбросами и транспортом (таблица 13).

Таблица 13 – Интегральные показатели *RI*

Среда	RI (min-max)	RI (среднее)	Категория риска	Ведущие элементы
снег	40-306	~134	низкий-высокий	Pb, Cd, Ni
почва	40-354	~126	низкий-высокий	Cd, Cu, Pb, Ni

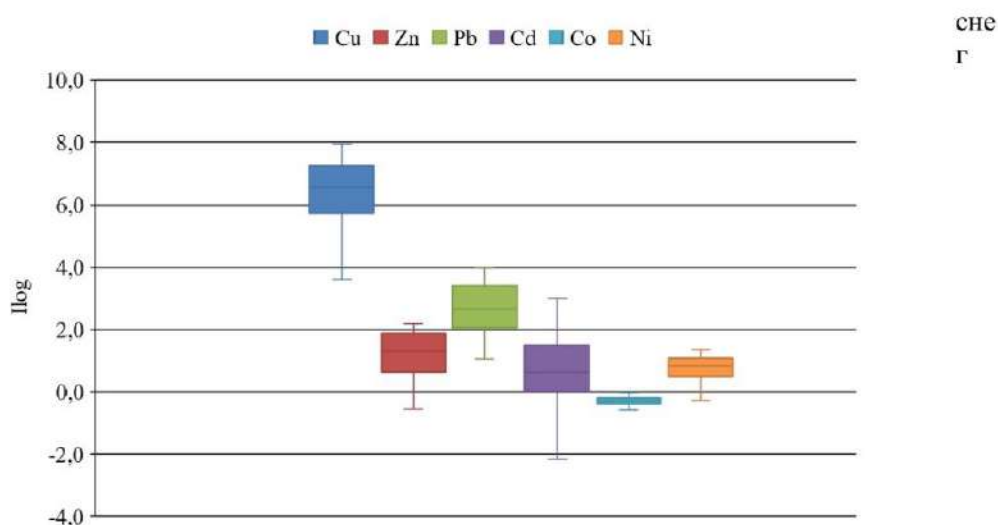
В почвах наблюдаются значительно более высокие коэффициенты загрязнения по цинку (до 36,7), свинцу (до 13,3), кадмию (до 7,0), меди (до 3,0) и никелю (до 4,0), что указывает на длительное накопление металлов в почвенном профиле, происходящее в результате многолетнего поступления загрязняющих веществ. Индивидуальные индексы риска достигали 210 для кадмия, 67 для свинца, 37 для цинка, 15 для меди и 20 для никеля. Значения интегрального индекса *RI* варьировали в диапазоне от 40 до 354, при среднем значении около 126, что также соответствует в целом «низкому» и «умеренному» риску. Однако в ряде участков были зарегистрированы высокие значения (ст. Каратас, пески Сарыесик-Атырау, с. Коктума, с. Жасталап, г. Текели), где отмечается значительная техногенная нагрузка.

В отличие от СП, в почвах ведущими элементами риска выступают кадмий, медь и цинк, что отражает особенности их поведения в литогенной среде и способность к долговременной аккумуляции. Свинец, несмотря на высокие показатели в снегу, в почвах проявляет менее выраженный эффект, что может быть связано с его низкой подвижностью и высокой сорбцией в верхних горизонтах.

Дополнительную характеристику уровня техногенного воздействия дает индекс геоаккумуляции (*Igeo*), рассчитанный по методике Мюллера, который позволяет оценить степень геохимического обогащения элементов относительно фона и служит инструментом пространственного анализа накопления загрязнителей.

В СП медианные значения *Igeo* для свинца и кадмия находились в диапазоне 2-3, что соответствует категории «среднего» загрязнения (рисунок 23). При этом в отдельных точках верхние квартильные значения и выбросы достигали 4-5, что свидетельствует об «очень сильном» загрязнении, особенно в районах Каратаса и Текели. Значения *Igeo* для никеля находились преимущественно в пределах 1-2, указывая на «умеренное» загрязнение, тогда как для меди и цинка показатели, как правило, не превышали 1 (*Igeo* ≤ 1), который соответствует «слабому» загрязнению либо его отсутствию, что согласуется с более низкими значениями *Cf* и *Er* этих элементов в СП.

Распределение *Igeo* по снегу отличалось выраженной асимметрией и наличием «тяжелых хвостов», что указывает на эпизодические атмосферные импульсы загрязнения и высокую пространственную вариабельность фоновых условий.



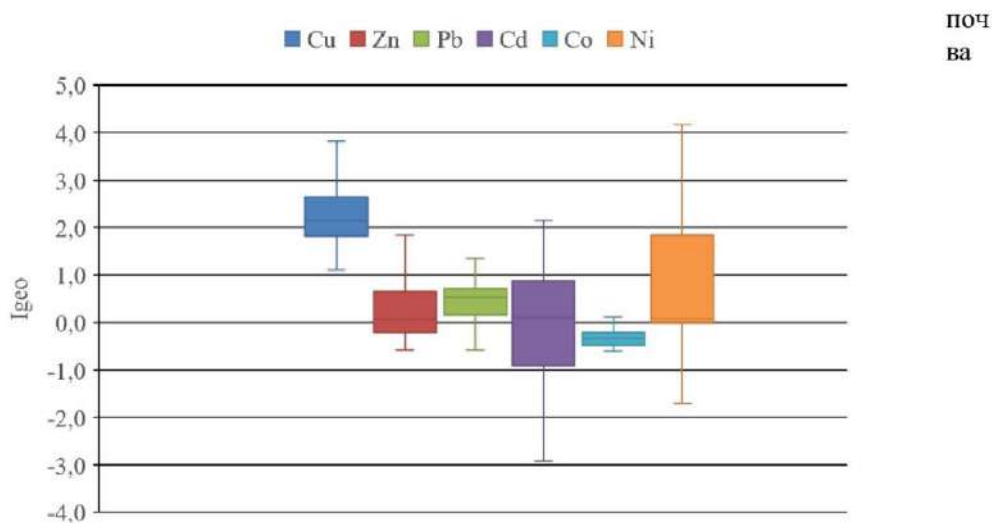


Рисунок 23 – Вариабельность индекса геоаккумуляции (*Igeo*) по ТМ в СП и почвах

Для почвы наблюдается иная ситуация, так, значения индекса геоаккумуляции (*Igeo*) для кадмия в большинстве образцов находились в диапазоне 2-3, что соответствует «среднему» уровню загрязнения. В отдельных точках *Igeo* достигал 4, указывая на «сильное» загрязнение. Медь и цинк показали медианные значения в пределах 1-2, то есть относятся к категории «умеренного» загрязнения. При этом по цинку наблюдались значительные отклонения вверх в районах Коктумы и Жасталапа, где фиксировались значения выше 3-4, что свидетельствует о локальных участках с «сильным» и даже «очень сильным» загрязнением. *Igeo* для свинца в почве колебался от 0,5 до 2, что означает в основном «слабое» или «умеренное» загрязнение. Значения по никелю и кобальту, как правило, не превышали 1, указывая на их близость к фоновому уровню и минимальное влияние на общее загрязнение почвы. В целом, распределение значений *Igeo* по почвам было более стабильным, без резких всплесков, что указывает на постепенное формирование загрязнения, т.е. в течение длительного времени, а буферные свойства почв сгладили краткосрочные колебания концентраций (рисунок 23).

Сравнительный анализ СП и почв показывает различие в экологическом профиле загрязнения при схожих средних значениях интегрального риска (*RI 130*). Снег, как временный индикатор, отражает краткосрочные атмосферные выбросы, преимущественно свинца, кадмия и никеля. Почвы, напротив, накапливают металлы на протяжении длительного времени, что определяет приоритетную роль кадмия, меди и цинка в формировании экологического риска. Никель, обладающий выраженной сезонной подвижностью, играет заметную роль в загрязнении снега, но демонстрирует меньшую значимость в почвах, вероятно, из-за его фиксации в малодоступной форме. Медь и цинк, напротив, проявляют себя преимущественно в почвенном профиле, где их вклад в *RI* значительно выше, чем в СП.

Структура вклада элементов в общий индекс *RI* различается:

- в снеге: кадмий 37 %, свинец 23 %, никель 30 %;
- в почвах: кадмий и медь 33 %, никель 15 %, свинец 11 %, цинк 3 %.

Как видно из рисунка (Box-plot диаграммы), статистически значимые различия в уровнях загрязнения подтверждают, что выбросы по свинцу и кадмию в СП, а также по кадмию, меди и цинку в почвах указывают на наличие локальных зон повышенной техногенной нагрузки. Наиболее экологически уязвимыми территориями остаются районы Каратаса, Коктумы, Талдыкоргана и Текели, где фиксируется совмещение высокой сезонной (атмосферной) и долговременной (почвенной) концентрации загрязняющих

веществ. Следовательно, данные участки требуют приоритетного экологического контроля и разработки мероприятий по снижению антропогенного давления.

В целом, несмотря на преобладание умеренных значений интегрального индекса риска (*RI*) как в СП, так и в почвах, выявленные локальные аномалии свидетельствуют о наличии участков с выраженной экологической нагрузкой, которые указывают на сохраняющийся техногенный пресс в отдельных районах, способный привести к деградации компонентов природной среды при отсутствии своевременных мер.

2.4 Системный анализ полученных результатов.

Системный анализ, проведенный для снежного и почвенного покрова Жетысуской области, охватывает широкий спектр показателей, включающих физико-химические свойства, концентрации ТМ и ПХБ, а также интегральные индексы загрязнения и экологического риска. Такой подход позволяет не ограничиваться фиксированием отдельных значений, а рассматривать их во взаимосвязи, выявлять закономерности распределения токсикантов по территории и определять их вклад в формирование экологической нагрузки. Особое внимание уделено сравнительному анализу СП как кратковременного депо атмосферных выпадений и почвенного покрова как долговременного аккумулятора загрязнителей, что обеспечивает возможность проследить миграцию элементов в системе «атмосфера – снег – почва» и выделить приоритетные зоны экологического риска.

Высота СП колебалась от 1,0 до 80,5 см, снегозапас от 0,9 до 137,6 кг/м², что свидетельствует о значительной пространственной неоднородности аккумуляции загрязнителей. Химический состав снега формировался под влиянием как природных, так и антропогенных факторов: со слабокисло-нейтральной реакцией среды (рН 5,0-7,0), минерализацией до 575 мг/дм³, высокими значениями органических и взвешенных веществ, а также биогенных соединений, что указывает на воздействие пылевого переноса, транспорта и промышленных источников.

В ходе выполненных исследований проведена комплексная оценка современного состояния депонирующих сред Жетысуской области, снежного и почвенного покрова с использованием химико-аналитических методов и расчетов интегральных экологических индексов. Основное внимание уделено содержанию ТМ и ПХБ, которые рассматриваются как ключевые индикаторы техногенного воздействия и экологической устойчивости природных систем региона.

Результаты анализа выявили выраженную пространственную неоднородность распределения загрязняющих веществ. Горные и предгорные районы Жонгар Алатау характеризуются фоновыми значениями, где суммарное содержание ТМ в СП составляет не более 10-20 мкг/дм³, а в почвах концентрации меди и цинка соответствуют природному уровню. В равнинной части области наблюдается формирование локальных зон повышенного загрязнения, приуроченных к промышленным и транспортным узлам. В районе гг. Талдыкорган и Текели, а также вдоль автомагистралей, концентрации свинца, кадмия, цинка и меди превышают фоновые значения в 2-5 раз, достигая по цинку 30,0-35,0 мкг/дм³, по свинцу 9,0-10,0 мкг/дм³, по кадмию 6,0-8,0 мкг/дм³, по никелю 8,0-10,0 мкг/дм³, а по кобальту 6,0-7,0 мкг/дм³. В поверхностных горизонтах почв содержание свинца и кадмия в индустриальных зонах превышает фон в 1,5-3,0 раза, что указывает на накопительный характер загрязнения и длительное техногенное воздействие.

Расчет экологических индексов подтвердил наличие контрастных геохимических обстановок. Коэффициенты накопления (*C_f*) для меди и цинка на большей части территории не превышают 1, что соответствует фоновой категории, тогда как для свинца и кадмия в отдельных районах значения достигают 5,0-10,0, отражая интенсивное антропогенное воздействие. Геоаккумулятивный индекс (*I_{geo}*) варьирует от -1 до 3, что соответствует диапазону от незагрязненного до сильно загрязненного состояния. Потенциальный экологический риск (*PERI*) изменяется от <100 единиц (низкий риск) в горных районах до >400 (высокий риск) в индустриальных центрах, при доминирующем влиянии кадмия и

свинца. Интегральный индекс загрязнения (Z_c) достигает 20-25 в наиболее нагруженных зонах, что указывает на высокий уровень техногенной нагрузки.

Наряду с ТМ выполнено определение содержания ПХБ, являющихся устойчивыми органическими загрязнителями с выраженным кумулятивным эффектом. Концентрации ПХБ в СП и почвах варьируют в пределах 0,01-0,15 мкг/дм³, что указывает на их присутствие даже в отдаленных районах региона и свидетельствует о дальнем атмосферном переносе и вторичном осаждении. Пространственное распределение ПХБ совпадает с зонами повышенных концентраций ТМ, что указывает на общность источников и механизмов их поступления в окружающую среду.

Сравнительный анализ данных по снегу и почве подтвердил корреляцию между атмосферным переносом загрязняющих веществ и их аккумуляцией в почвенном покрове. Снежный покров отражает текущую сезонную динамику загрязнения, тогда как почвы выступают в роли долговременного депо, фиксируя интегральный эффект воздействия.

Совокупная оценка показала, что экосистемная устойчивость Жетысуской области в целом остается удовлетворительной: большая часть территории сохраняет фоновое экологическое состояние, а выявленные локальные зоны риска носят ограниченный характер. Горные и предгорные районы функционируют как природные барьеры, препятствующие дальнейшему распространению загрязняющих веществ, что обеспечивает сохранение природного потенциала региона.

Проведенные исследования подтвердили эффективность выбранной методики и использование индексов C_f , I_{geo} , $PERI$, Z_c в качестве объективных инструментов количественной оценки состояния природных сред. Полученные результаты обладают высокой научной и практической значимостью, обеспечивая надежную основу для оценки степени техногенной трансформации, выявления зон повышенного экологического риска и выработки научно обоснованных рекомендаций по сохранению экологического равновесия Жетысуской области.

Опубликована 1 (одна) статья, в научном издании, рекомендованном КОКНВО и одна (1) статья в рецензируемом научном издании, имеющем процентиль по CiteScore в базе Scopus не менее 65 (Приложение 1).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы (действует с 01.07.1991). – М.: Госкомгидромет, 1991. – 693 с.
2. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. – М.: Изд. стандартов, 2004. – 4 с.
3. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартиформ, 2019. – 23 с.
4. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 442 с.
5. Унифицированные методы анализа вод // Под общей редакцией Ю.Ю. Лурье. – М.: Химия, 1973. – 376 с.
6. ПНДФ 14.1:2.22-95. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентраций ионов железа, кадмия, свинца, цинка и хрома в пробах природных и сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии. Утвержден министерством охраны окружающей среды РФ 28.08.1995. – М.: ТОО «Кортек», 1995. – 17 с.
7. СТ РК ИСО 8288-2005. «Качество воды. Определение кобальта, никеля, меди, цинка, кадмия и свинца. Пламенные атомно-абсорбционные спектрометрические методы» (ИСО 8288:1986). Введен 2005-01-09. – Астана, 2005. – 20 с.
8. Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород (Руководство к лабораторным занятиям до инженерной геологии). – Л.: «Недра», 1972. – 312 с.

9. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: Учебное пособие для вузов. -2-е изд., перераб. и доп. – Л.: «Недра», 1990. – 328 с.
10. РД 52.18.289-90. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. – М.: Государственный комитет СССР по Гидрометеорологии, 1990. – 37 с.
11. СТБ ИСО 6468-2003 Качество воды. Определение некоторых хлорорганических инсектицидов, полихлорированных бифенилов и хлорбензолов методом газовой хроматографии после экстракции жидкость-жидкость. – Минск: 2004. Госстандарт, 26.
12. Liston G.E., Elder K. A distributed snow-evolution modelling system (SnowModel) // *Journal of Hydrometeorology*. – 2006. – Vol. 7(6). – P. 1259–1276.
13. Likens G.E., Driscoll C.T., Buso D.C. Acid rain // *Scientific American*. – 1979. – Vol. 241(4). – P. 43–51.
14. Thimonier A., Schmitt M., Waldner P., Rihm B. Atmospheric deposition on Swiss forest sites: Trends, inter-site variation and dependence on forest characteristics // *Atmospheric Environment*. – 2005. – No. 39(4). – P. 567–578.
15. Seinfeld J.H., Pandis S.N. An Analysis of Air Pollutants' Emission Coefficient in the Transport Sector of Tehran // *Open Journal of Ecology*. – 2017. – Vol. 7(5). <https://doi.org/10.4236/oje.2017.75022>
16. Андронников В.В., Савченко П.Д. Влияние климатических особенностей региона на степень загрязнения атмосферы // *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. – 2012. – № 1(3). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-klimaticheskikh-osobennostey-regiona-na-stepen-zagryazneniya-atmosfery> (дата обращения 16.04.2025).
17. Yang X., Zhang Q., Wang X., Zhao Y., Yu G. Chemical characteristics and sources of snowpack ions in a semi-arid agricultural region of northern China // *Atmospheric Research*. – 2020. – Vol. 235. – P. 104785. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104785>
18. Zhang C., Mou N., Niu J., Zhang L., Liu F. Spatio-Temporal Variation Characteristics of Snow Depth and Snow Cover Days over the Tibetan Plateau // *Water*. – 2021. – Vol. 13(3). – P. 307. <https://doi.org/10.3390/w13030307>
19. Коноплев А.В., Никитин В.А., Самсонов Д.П., Черник Г.В., Рычков А.М. Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды в атмосфере дальневосточной российской Арктики // *Метеорология и гидрология*. – 2005. – № 7. – С. 38–44.
20. Амиргалиев Н.А. Полихлорированные бифенилы в водной экосистеме Иле-Балкашского бассейна. – Алматы: ТОО «Нурай Принт Сервис», 2016. – 192 с.
21. Amirgaliev N.A., Medeu A.R., Opp C., Madibekov A., Kulbekova R., Ismukhanova L., Zhadi A. Polychlorinated biphenyls in the snow cover of South-Eastern Kazakhstan // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2022. – Vol. 12(17). – P. 8660. <https://doi.org/10.3390/app2178660>
22. Amirgaliev N., Madibekov A., Mussakulkyzy A., Ismukhanova L., Kulbekova R. Polychlorinated biphenyls in the snow cover of Almaty agglomeration of the republic of Kazakhstan // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Ecology, economics, education and legislation. Ecology and Environmental protection. (30 June - 6 July, 2019). – Albena, Bulgaria, 2019. – Vol. 19. – P. 541–549.
23. Амиргалиев Н.А., Мадибеков А.С., Исмуханова Л.Т., Мұсақұлқызы А., Кулбекова Р.А., Жәди А.Ө. Токсичные соединения в снежном покрове и их влияние на природные объекты урбанизированных территорий (на примере Алматинской агломерации). – Алматы, 2021. – 200 с.

24. Amirgaliev N.A., Medeu A.R., Opp C., Madibekov A., Kulbekova R., Ismukhanova L., Zhadi A. Polychlorinated biphenyls in the snow cover of South-Eastern Kazakhstan // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2022. – Vol. 12(17). – P. 8660. <https://doi.org/10.3390/app/2178660>
25. Амиргалиев Н.А., Мадибеков А.С., Кулбекова Р.А. Исмуханова Л.Т. Полихлорированные бифенилы в снежном покрове территории дельты р. Или и Южного Прибалхашья // IV Байкальская международная научная конференция-стратегическая сессия. «Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли» (г. Иркутск, 21 – 25 июня 2022 г.). – Иркутск, 2022. – С. 37–42.
26. Янченко Н.И., Яскина О.Л. Особенности химического состава снежного покрова и атмосферных осадков в городе Братске // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324. – № 3. – С. 28–35.
27. Василенко В.Н., Назарова И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 182 с.
28. Мадибеков А.С. Атмосферный перенос загрязняющих веществ с осадками в Иле Балхашском бассейне // Сбор. труд. III Международ. научно-практич. конференц. «Проблемы совершенствования управления природными и социально-экономическими процессами на современном этапе» (5-6 июня 2016 г.). – Бишкек-Екатеринбург, 2016. – С. 142–147.
29. Мадибеков А.С. Пространственное распределение химического состава атмосферных осадков по южной части территории Казахстана: дисс. на соискание... канд. геогр. наук: 25.00.30. – Бишкек, 2012. – 136 с.
30. Асылбекова С.Ж., Исбеков К.Б., Лопарева Т.Л., Анурьева А.Н. Влияние воздушных выбросов промышленного комплекса «Балхашцветмет» на биоценозы озера Балхаш // *Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство*. – 2011. – № 1. – С. 7–14.
31. Мадибеков А.С. О сезонных выпадениях микроэлементов // *Вестник КРСУ. Серия географическая*. – Бишкек, 2011. – С. 68–72.
32. Ажаев Г.С. Оценка экологического состояния г. Павлодара по данным геохимического изучения жидких и пылевых атмосферных выпадений: автореферат дисс... канд. геолого-минералогических наук (25.00.36). Павлодарский гос. пед. инс-т. – Томск, 2007. – 26 с.
33. Василевич М.И., Щанов В.М., Василевич Р.С. Применение спутниковых методов исследований при оценке загрязнения снежного покрова вокруг промышленных предприятий в тундровой зоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2015. – Т. 12. – № 2. – С. 50–60. – URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2015t2/50-60.pdf (дата обращения 05.08.2025).
34. Валетдинов А.Р. Технология комплексной оценки влияния промышленных объектов на загрязненность тяжелыми металлами природных сред по результатам мониторинга СП: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. – Казань, 2006. – 19 с.
35. Сагит Ю. У. и др. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
36. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве // Рекомендации подготовлены в лаборатории геохимии окружающей среды Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов Мингео СССР и АН СССР (ИМГРЭ) к.м.н. Б.А. Ревичем, д.г.-м.н. Ю.Е. Сагитом, к.м.н. Р.С. Смирновой. Утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 15 мая 1990 г., N 5174-90. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200087676> (дата обращения 17.05.2025).
37. Ревич Б.А., Сагит Ю.Е., Смирнова Р.С., Сорокина Е.П. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 110 с.
38. МУ 2.1.7.730-99. Методические указания. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. – М., 1999. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003852> (дата обращения 14.06.2025).

39. Почвенный покров: тяжелые металлы. — URL: <http://medbiol.ru/medbiol/ecology/000305f4.htm> (дата обращения 17.06.2025).
40. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach // *Water Research*. — 1980. — No. 14. — P. 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
41. Omwene P.I., Oncel M.S., Celen M., Kobya M., Heavy metal pollution and spatial distribution in surface sediments of Mustafakemalpasa stream located in the world's largest borate basin (Turkey) // *Chemosphere*, — 2018. — No. 208. — P. 782–792. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.031>
42. Duodu G.O., Goonetilleke A., Ayoko G.A. Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metal in Brisbane River sediment // *Environmental Pollution*. — 2016. P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.008>
43. Sarkar S., Ghosh P.B., Sil A.K., Saha T. Heavy metal pollution assessment through comparison of different indices in sewage fed fishery pond sediments at East Kolkata Wetland India // *Environ. Earth Sci.* — 2010. — No. 63. — P. 915–924. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0760-7>

