

УДК 504.054

Биогеохимические особенности сосняков лесостепи Челябинской области

Глинских А. Д.

Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета
Санкт-Петербург, Россия
ana.glin@yandex.ru

В работе дается комплексная оценка интенсивности загрязнения отдельных участков лесной растительности лесостепной зоны Челябинской области, разнудаленных от источников загрязнения (в районе источников загрязнения, буферной и переходной зонах), производится оценка радиуса действия тех или иных промышленных центров на окружающую среду. Исследование проводилось, главным образом, методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), а также с использованием потенциометрического метода измерения рН. Полевые работы проводились в 2021 году. В качестве исследуемых компонентов биогеоценозов были выбраны почва, корка и хвоя сосны (*Pinus sylvestris* L.), листья подроста рябины (*Sorbus aucuparia* L.), надземная часть доминантов травяно-кустарничкового яруса. В статье приводятся данные по различным биогеохимическим коэффициентам – коэффициенту концентрации, коэффициенту биологического накопления и суммарному показателю загрязнения. Суммарное загрязнение почв – привлекающее особое внимание – отражено в виде картографического материала. Показатели кислотности продемонстрировали кислую, слабокислую и нейтральную реакции почв. Общие различия между коэффициентами биологического накопления для разных компонентов исследования объясняются физиологическими особенностями: корка демонстрирует долгосрочное накопление, хвоя отражает накопление за несколько вегетационных сезонов, листья рябины и листья травянистых растений – сезонное. Примечательно, что цинк – единственный химический элемент, демонстрирующий высокие значения корреляции для всех компонентов исследования. В травяно-кустарничковом ярусе наблюдается ярко выраженная концентрационная функция у листьев растений рода *Filipendula*. Половина исследуемых сосняков, располагающихся в восточной и юго-восточной частях лесостепи демонстрируют отсутствие влияния на них крупных промышленных центров и характеризуется допустимыми показателями загрязнения. Другая половина, приуроченная к северо-западной и центральной частям лесостепи, испытывает негативное влияние промышленных центров.

Ключевые слова: биогеохимия, экология, сосняки, загрязнение, тяжелые металлы.

ВВЕДЕНИЕ

Как сообщает Минприроды России, экологическая обстановка в Челябинской области остается одной из самых напряженных в России. Челябинская область лидирует по выбросам в атмосферный воздух твердых веществ – 1 место в России (более трети всех выбросов твердых частиц); по оксиду углерода – 2 место (около 6 процентов всех выбросов); по диоксиду серы – 5 место (около 4 процентов всех выбросов) (Васенина, Сушко, 2020). Так, согласно имеющимся данным, в 2020 году количество выброшенных диоксидов серы и азота соответственно составило 251403 и 468496 тонн в Уральском федеральном округе (Доклад об экологической..., 2021).

Высокий уровень антропогенной нагрузки обусловлен влиянием крупных промышленных центров, таких как Челябинск, Карабаш, Кыштым, Коркино и других.

Основными лесобразующими породами лесостепи Челябинской области являются береза (*Betula* L.) и сосна (*Pinus* L.). При этом область характеризуется низкими показателями лесистости (29,4 %), а сосняки лесостепи представлены, в основном, островными борами (Постановление губернатора..., 2017). Названия растений даны по сводке С.К. Черепанова (1995).

В связи с вышесказанным сохранение этих лесов является одной из важнейших задач в рамках лесного хозяйства Челябинской области.

Цель работы – выявить биогеохимические особенности сосняков лесостепи Челябинской области по пяти компонентам биогеоценозов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые работы проводились в период с 03.08.2021 по 03.09.2021. Началом маршрута является участок леса в окрестностях города Кыштыма – одного из промышленных центров лесостепи Челябинской области. Кыштым располагается на северо-западной границе лесостепи. Окончание маршрута – город Троицк, располагающийся на юго-восточной границе лесостепи и, одновременно, у государственной границы с Казахстаном. В ходе полевых исследований производился выбор участков сосняков, расположенных на расстоянии, приблизительно равном 10 км. В районах наиболее сильного промышленного воздействия (Кыштым, Челябинск) закладывалось несколько пробных площадей (ПП). Две ПП были заложены вне намеченного маршрута – в Октябрьском районе, где предполагались наименьшие показатели загрязнения почвы и растительности – чтобы принять их за региональный фон. Общая протяженность маршрута составляет около 243 км, количество заложённых ПП площадью 400 м² – 31.

В ходе работы на территории Зауральского пенепплена было заложено 20 ПП (причем часть из них находится на границе с горно-лесной зоной), на Западно-Сибирской низменности – 8. Еще три ПП оказались на границе между Зауральским пенеппленом и Западно-Сибирской низменностью.

Таким образом, для исследуемой трансекты характерно 2 значимых флористических рубежа (Левит, 2005; Куликов, 2005; Степи и лесостепи..., 2006).

На северо-западе наиболее значимыми промышленными центрами являются АО «Кыштымский медеэлектролитный завод» в городе Кыштым и АО «Карабашмедь» в Карабаше. В центральной части района исследования располагается город Челябинск, большая часть промышленных предприятий которого сконцентрирована в Металлургическом районе (АО «Челябинский электрометаллургический комбинат», ПАО «Мечел», ПАО «Челябинский трубопрокатный завод», ПАО «Челябинский цинковый завод»). При движении на юго-восток области встречаются следующие промышленные центры: Томинский ГОК и Коркинский угольный разрез, использующийся в качестве хвостохранилища Томинского ГОК, города Южноуральск и Троицк.

В качестве исследуемых компонентов биогеоценозов были выбраны почва, корка сосны (*Pinus sylvestris* L.), хвоя сосны, листья подроста рябины (*Sorbus aucuparia* L.), надземная часть доминантов травяно-кустарничкового яруса (Терехина, 2010). На трех пробных площадях не произрастала рябина, в связи с чем всего было отобрано 152 образца.

Анализ проводился в Ресурсном центре Научного парка СПбГУ «Методы анализа состава вещества» методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Модель используемого прибора – ICPE-9000. Анализ проводился под руководством Волиной Ольги Владимировны – кандидата химических наук, ведущего специалиста Ресурсного центра СПбГУ.

Метод ИСП-МС основан на принципах атомной эмиссионной спектроскопии, включающей несколько аналитических методов, используемых для определения элементного состава пробы посредством исследования ее электромагнитного спектра или масс-спектра (МС). Данный метод был выбран в связи с его высокой точностью (> 10⁻⁵ %). Стандартные образцы анализируемых элементов для калибровочных растворов приготовлены из мультикомпонентного стандарта MERCK в 0,1N растворе азотной кислоты. Диапазон калибровочных растворов: 0,001-100 мг/л. Спектральный анализ растворов образцов проводился в аксиальном режиме с разбавлением в 10 раз и без разбавления (Методы физико-химического..., 2015; Илларионова, 2021).

Известно, что тяжелые металлы в почве могут находиться в малоподвижной и подвижной растворимой форме. В работе для анализа были выбраны подвижные формы элементов, демонстрирующие более значимую корреляцию между растениями и почвами и способные достоверно отразить степень антропогенного воздействия на растительное сообщество (Безуглова, Орлов, 2000). Для исследования были выбраны следующие элементы: во всех образцах определялись подвижные формы тяжелых металлов (Fe, Ni, Cr, Co, Mn, Cu, Pb, Cd,

Zn) и Al, в почвах, в силу отсутствия этапа сухого озонения, дополнительно определялась ртуть (Hg), а также сера (S) и фосфор (P).

Следует сразу отметить, что содержание ртути оказалось ниже предела обнаружения (<LQ) во всех пробах.

Также в лаборатории геоэкологического мониторинга института Наук о Земле СПбГУ оценивались показатели значений актуальной и потенциальной кислотности почв.

После получения результатов вычислялось среднее значение из двух повторностей для каждой пробы, которое и использовалось в дальнейших расчетах: осуществлялась статистическая обработка результатов, вычислялись биогеохимические коэффициенты (Кс – коэффициент концентрации, Кбн – коэффициент биологического накопления, Zс – суммарный показатель загрязнения) (Терехина, 2010).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе работы также было заложено 2 ПП (ПП № 30 и 31), которые должны были выступить в качестве регионального фона (Сф) для всех компонентов исследования. Однако было установлено, что концентрация ряда химических элементов на ПП № 31 достаточно высока и не позволяет выбрать данный участок в качестве регионального фона. В связи с чем возникла необходимость выделения альтернативных ПП с наиболее низкими значениями концентраций химических элементов, а также поиска дополнительных референсных значений. Было выявлено четыре ПП, отличающиеся наиболее низкими концентрациями химических элементов: ПП № 18, 19, 20 и 30. Путем вычисления среднего получены фоновые концентрации всех элементов.

Полученные Zс, соответствующие тем или иным ПП, были сгруппированы по своим значениям и нашли отражение в районировании территории. Так, в результате была получена карта, на которой отмечены зоны чрезвычайно опасной, умеренно опасной, буферной категорий загрязнения, а также зона с допустимым уровнем загрязнения (рис. 1).

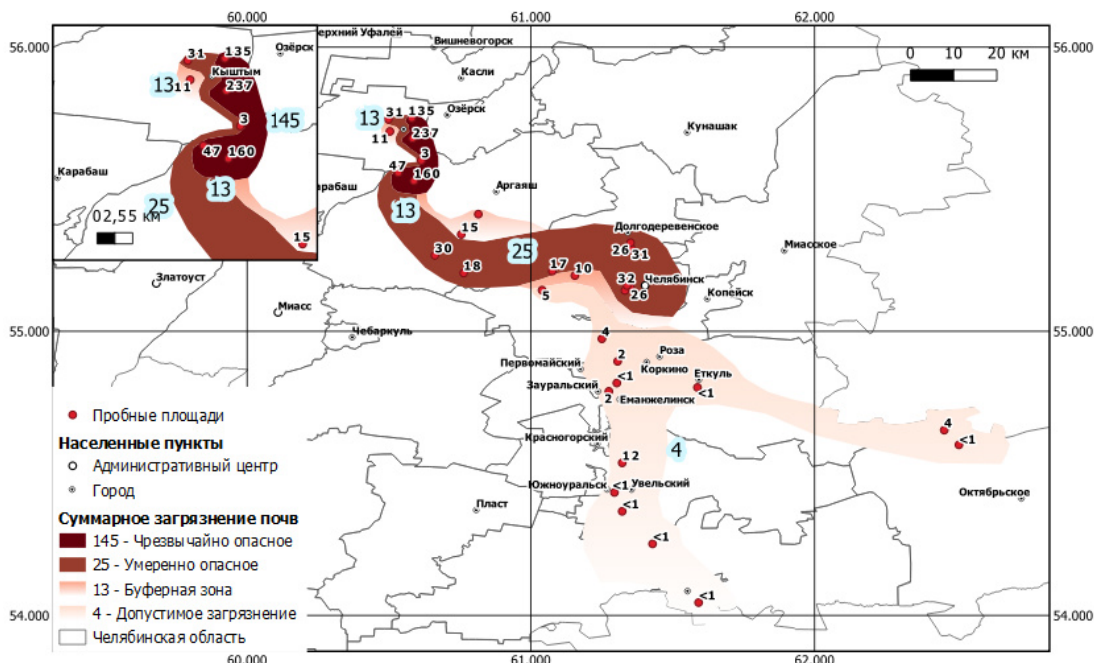


Рис. 1. Уровень суммарного загрязнения почв сосняков лесостепи Челябинской области
Цифрами рядом с точками ПП обозначены показатели суммарного загрязнения, характерные для конкретной ПП.

Уровень опасности загрязнения почв устанавливается по ориентировочной оценочной шкале, предложенной в СанПиН 2.1.7.1287-03.

Также в ходе исследования была дана оценка вклада отдельных химических элементов в суммарные показатели загрязнения почв (рис. 2).

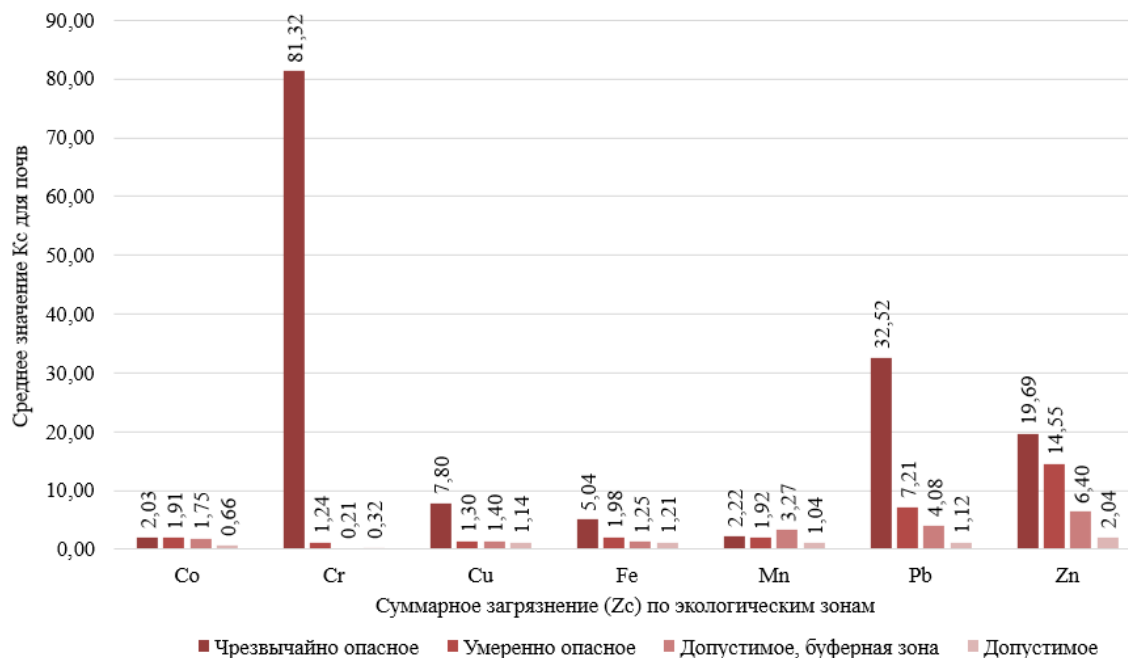


Рис. 2. Вклад отдельных химических элементов в показатели суммарного загрязнения почв экологических зон исследуемого района

Показатели кислотности продемонстрировали кислую, слабокислую и нейтральную реакции почв (табл. 1).

Таблица 1

Статистические показатели почв (Kс, Zс и рН) по экологическим зонам

Категория загрязнения	Среднее значение Kс							Среднее значение Zс	рН (водный)	рН (KCl)
	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn			
Чрезвычайно опасное	2,03	81,32	7,80	5,04	2,22	32,52	19,69	144,67	4,76	3,92
Умеренно опасное	1,91	1,24	1,30	1,98	1,92	7,21	14,55	25,12	5,79	5,02
Допустимое, буферная зона	1,75	0,21	1,40	1,25	3,27	4,08	6,40	13,07	5,83	4,94
Допустимое	0,66	0,32	1,14	1,21	1,04	1,12	2,04	4,39	5,92	5,16

Минимальное значение актуальной рН – 4,27 (ПП № 2), максимальное – 6,9 (ПП № 29); для потенциальной кислотности минимальное значение рН – 3,52, максимальное – 6,28 (для тех же ПП). Для данного района исследования характерны черноземы языковатые и карманистые выщелоченные (нейтральная рН), лугово-черноземные солонцеватые (слабощелочная рН) и серые лесные (слабокислая) (Национальный атлас..., 2011).

Принимая во внимание высокий уровень антропогенной нагрузки, можно сделать вывод о том, что низкие значения рН обусловлены влиянием промышленных центров: наиболее низкими значениями рН характеризуются ПП экологической зоны с чрезвычайно опасным уровнем загрязнения. Известно, что увеличение кислотности почв ведет к сокращению

запасов питательных элементов (особенно магния и кальция), повышению мобильности токсичных для растений алюминия, марганца, меди, цинка и разрушению всего почвенного комплекса (Павлов, 2006).

Согласно полученным данным, среди растительных компонентов сосняков наиболее заметные показатели загрязнения отмечаются для корки, основными элементами-загрязнителями выступают Pb, Cu, Cd, Zn. Наибольшие значения Кс корки сосны отмечаются для проб, отобранных на ПП № 9, 10, 27. Эти же точки характеризуются и максимальными значениями показателя суммарного загрязнения.

Следует также отметить, что Кс по меди ($r = 0,78$), свинцу ($r = 0,79$), цинку ($r = 0,75$) и Zc ($r = 0,54$) для корки и почвы хорошо коррелируют, что позволяет сделать вывод о том, что корка сосны выступает хорошим фитоиндикатором загрязнения.

Для хвои, листьев рябины и травянистых растений не отмечаются значения суммарного показателя загрязнения, позволяющего отнести ПП к умеренно опасным (и выше) по загрязнению (исключение – ПП № 9, Zc = 26. Растение-доминант – *Rubus saxatilis*). ПП № 9 располагается в сосновом бору, протянувшемся вдоль берега озера Увильды, являющегося наиболее популярным местом отдыха жителей Челябинской области.

Так, для хвои среднее значение Zc = 2, а для листьев рябины, как и для травянистых растений, среднее значение Zc = 3. Следует также отметить, что разные химические элементы неодинаково накапливаются растениями: например, Mn очень слабо концентрируется сосной (как коркой, так и хвоей), тогда как листья рябины концентрируют и накапливают его очень эффективно.

Общие различия между Кбн для разных компонентов исследования объясняются физиологическими особенностями: корка демонстрирует долгосрочное накопление, хвоя отражает накопление за несколько вегетационных сезонов, листья рябины и листья травянистых растений – сезонное. Но представляется значимым, что Кбн Zn для хвои зачастую выше, чем для корки, также он достаточно высок для листьев рябины. Таким образом, цинк – металл, эффективнее накапливаемый фотосинтезирующими органами растений и демонстрирующий сезонное загрязнение. Примечательно, что цинк – единственный химический элемент, демонстрирующий высокие значения корреляции для всех компонентов исследования.

В травяно-кустарничковом ярусе наблюдается ярко выраженная концентрационная функция у листьев растений рода *Filipendula*.

В целом, сезонные показатели загрязнения не являются высокими. В связи с этим представляется справедливым, что современные промышленные предприятия характеризуются инновационными системами очистки выбросов, защищающие окружающую среду от попадания большого количества поллютантов. Корка и почва могут демонстрировать загрязнение, накопленное за прошлый длительный период эксплуатации предприятий, функционирующих без должных систем очистки.

Согласно полученным данным, наиболее загрязненными в целом оказались сосняки, приуроченные к северо-западной части лесостепи и находящиеся в радиусе нескольких десятков км от промышленных предприятий (так, ПП № 9 находится на расстоянии 23 км от АО «Кыштымский медеэлектролитный завод» и 25 км от АО «Карабашмедь»). Следует отметить тот факт, что ПП № 9, характеризующаяся наиболее критическими показателями загрязнения как отдельных компонентов биогеоценоза, так и суммарного загрязнения, располагается в развитой курортной зоне озера Увильды.

Сосняки, протянувшиеся с северо-запада к городу Челябинску также продемонстрировали достаточно высокие показатели загрязнения. Выявить радиус действия предприятий, действующих на сосняки импактной зоны с умеренно опасным уровнем загрязнения не представляется возможным, так как на расстоянии 80 км (Кыштым – Челябинск) происходит наложение радиусов воздействия ряда промышленных центров друг на друга. Юго-восточная часть лесостепи оказалась свободной от негативного воздействия поллютантов. Важно отметить, что расположенный южнее от города Челябинска Томинский ГОК (в зоне влияния которого оказались ПП № 16, 17 и 29), в настоящее время не оказывает негативного воздействия на окружающую среду. Это значимо в свете того, что строительство Томинского ГОК в 2013 году вызвало у жителей области серьезный общественный резонанс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, половина исследуемых сосняков, располагающихся в восточной и юго-восточной частях лесостепи демонстрируют отсутствие влияния на них крупных промышленных центров и характеризуется допустимыми показателями загрязнения. Другая половина, приуроченная к северо-западной и центральной частям лесостепи, испытывает негативное влияние промышленных центров.

В связи с вышесказанным представляется особенно важным сохранять и защищать сосняки лесостепи Челябинской области. Этому может способствовать дальнейшее совершенствование очистных систем на промышленных предприятиях, создание более развитой сети ООПТ и снижение уровня рекреационной нагрузки на сосняки.

Список литературы

- Безуглова О. С., Орлов Д. С. Биогеохимия. – Ростов н /Д: «Феникс», 2000. – 320 с.
- Васенина И. В., Сушко В. А. Влияние промышленной инфраструктуры на экологию региона и качество жизни местного населения // Социология. – 2020. – № 2. – С. 205–214.
- Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2020 году. Министерство экологии Челябинской области. – 2021. – 434 с.
- Илларионова Е. А., Сыроватский И. П. Основы метода масс-спектрометрии. Практическое применение метода : учебное пособие. – Иркутск : ИГМУ, 2021. – 49 с.
- Левит А. И. Южный Урал: География, экология, природопользование. – Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 2005. – 246 с.
- Куликов П. В. Конспект флоры Челябинской области. – Екатеринбург – Миасс: «Геотур», 2005. – 537 с.
- Методы физико-химического анализа почв и растений / [Ред. М. Г. Опекунова]. – Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2015. – 84 с.
- Национальный атлас почв Российской Федерации. – М.: Астрель: АСТ, 2011. – 632 с.
- Павлов И. Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения : [монография]. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского науч. центра СО РАН, 2006. – 359 с.
- Постановление губернатора Челябинской области от 29.12.2017 г. № 282 «Об утверждении Лесного плана Челябинской области на 2019–2028 гг.» [Электронный ресурс]. – Главное управление лесами Челябинской области. – Режим доступа: <https://priroda.gov74.ru/> (просмотрено 15.08.2022)
- Степи и лесостепи Зауралья: материалы к исследованиям: тр. музея-заповедника «Аркаим» / [Ред. Ф. Н. Петров]. – Челябинск: Крокус, 2006. – 190 с.
- Терехина Н. В. Методические указания к проведению фитогеохимических исследований. – СПб, 2010. – 25 с.

Glinskikh A. D. Biogeochemical features of forest-steppe pine forests in the Chelyabinsk region // Ekosistemy. 2023. Iss. 34. P. 30–35.

The work gives a comprehensive assessment of the intensity of pollution of certain areas of forest vegetation forest-steppe zone of the Chelyabinsk region, different distances from the sources of pollution (in the area of pollution sources, buffer and transition zones), the assessment of the radius of action of certain industrial centers on the environment. The study was carried out mainly by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), as well as using a potentiometric method of measuring pH. The field work was carried out in 2021. The soil, pine (*Pinus sylvestris* L.) crust and needles, leaves of rowan (*Sorbus aucuparia* L.) undergrowth, and the above-ground part of the dominant grass and shrub tier were chosen as the biogeocenosis components under study. The article provides data on various biogeochemical coefficients - the concentration factor, the coefficient of biological accumulation and the total pollution index. The total pollution of soils - which attracts particular attention - is reflected in the form of cartographic material. Indicators of acidity demonstrated acidic, weakly acidic and neutral reactions of soils. General differences between the coefficients of biological accumulation for different components of the study are explained by physiological features: crust demonstrates long-term accumulation, needles reflect accumulation over several growing seasons, leaves of mountain ash and leaves of herbaceous plants - seasonal. It is noteworthy that Zn is the only chemical element showing high correlation values for all components of the study. In the herbaceous-bush layer, a pronounced concentration function is observed in the leaves of plants of the genus *Filipendula*. Half of the studied pine forests, located in the eastern and south-eastern parts of the forest-steppe demonstrate no influence of large industrial centers and are characterized by permissible pollution indicators. The other half, confined to the northwestern and central parts of the forest-steppe, experiences a negative impact of industrial centers.

Key words: biogeochemistry, ecology, pine forests, pollution, heavy metals.

Поступила в редакцию 25.11.22

Принята к печати 15.02.23