

УДК 58.04

В.М. Жукова, Т.М. Зоркина, Е.Ю. Жукова, Ф.Н. Кудров
ФГБОУ ВПО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова»,
Абакан

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ СВИНЦА В СТЕПНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В РАЙОНЕ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ «ХАКАССКАЯ»

Ключевые слова: степная растительность, растительные сообщества, свинец, почва, продуктивность.

Статья посвящена исследованию содержания ионов свинца (Pb^{2+}) в степной растительности и почве в районе угольной шахты «Хакасская». Выявлена динамика их накопления в течение вегетационного периода в наземной фитомассе и почвах. На исследуемых участках выявлено повышенное содержание данного элемента в почвах (25,3-53,4 мг/кг). Установлено, что растительность накапливает свинца в 4 раза меньше по сравнению с почвой.

V. Zhukova, T. Zorkina, E. Zhukova, F. Kudrov
FSBEI HPI «Khakass State University named after N. Katanov», Abakan

FEATURES OF THE ACCUMULATION OF LEAD IN THE STEPPE VEGETATION near THE “KHAKASSKAYA” COAL MINE

Keywords: steppe vegetation, plant communities, lead, soil, productivity.

This article is devoted to the research on the content of lead ions (Pb^{2+}) in the steppe vegetation and soil near the “Khakasskaya” coal mine. The dynamics of their accumulation in above-ground phytomass and soils during the vegetation period was identified. A high concentration of the element (25.3-53.4 mg/kg) in soils of the studied plots was revealed. It was defined that vegetation accumulates 4 times less lead than soil.

Введение. В результате добычи угля в воздух попадают поллютанты из технологических установок, транспорта и сопутствующих производств. Угледобывающие шахты существенно изменяют химический состав территории и гидродинамический режим вод, иссушают грунт [13]. Проблема загрязнения окружающей среды свинцом и его соединениями одна из наиболее актуальных экологических проблем в мире, в том числе и в России. Риск для здоровья людей, в первую очередь детей, усугубляется высокой токсичностью свинца и его способностью накапливаться в организме человека [7, 10, 12].

Загрязнение свинцом среды вызывает тревогу не только потому, что оно может заметно снизить продуктивность растений, нарушить естественные фитоценозы, вызвать угрозу деструкции ассимиляционного потенциала фитомассы, приве-

сти к появлению специфических терратогенных изменений в растениях, но и потому, что оно неизбежно ухудшает гигиеническое качество среды обитания человека, включая и гигиеническое качество продуктов сельского хозяйства [9].

В Усть-Абаканском районе, где располагалась исследуемая территория, подвижные формы свинца по количеству соотношению занимают вторую позицию (1,40 мг/кг – наибольшее значение среди всех районов Хакасии), сразу после цинка (4,78 мг/кг), содержание остальных тяжелых металлов не превышало 0,300-0,100 мг/кг. В целом, содержание загрязнителей не превышало ПДК. Поскольку свинец, в отличие от цинка, не включается в метаболизм растения, для изучения был выбран этот металл [4].

Загрязнение почв ионами Pb^{2+} переводит функционирование природных со-

обществ в режим резистентности [3], поэтому для экологического нормирования воздействия тяжелыми металлами необходима оценка состояния растительности и ее продуктивности [11].

Цель – провести исследование накопления ионов свинца в надземной фитомассе и почве в течение вегетационного периода и выявить степень их загрязнения.

Методика и условия. Исследования проводились с мая по сентябрь 2009-2012 гг. в окрестностях шахты «Хакасская» г. Черногорска (ООО «Суэк-Хакасия»).

Шахта расположена на Черногорском месторождении угля Минусинского каменноугольного бассейна. Промкотельная на шахте «Хакасская» оборудована 3 котлоагрегатами, работающими со слоевым сжиганием топлива на неподвижной колосниковой решетке. Очистка газов осуществляется в батарейных циклонах. На западе и юго-западе от горного отвода находится Черногорский угольный разрез. На западе находится карьер ООО

«Аргиллит», на северо-западе – карьер ОАО «Хакасский бентонит». На самой шахте, в северо-восточной части горного отвода, имеется участок выхода на поверхность горелых пород и плохо рекультивированный карьер. Таким образом, на территории горного отвода шахты все компоненты природной среды подвергаются техногенному воздействию от разного рода источников. В северо-восточной части горного отвода (район бывшего карьера и вентиляционных шурфов из шахты) обнаружены повышенные концентрации в твердом осадке снегового покрова: Ba, B, Br, Be, Mg, V, Ge, Ni, Cr, Cs, Sb, Sc, Th, U, Co; в почве: B, Cu, Mg, Zn, Br, Co, Sc, Ba, Ni, Pb; в пыли: Sr, Ba, Sc, Br, Th, As [13].

Важнейшими факторами, влияющими на перераспределение ионов свинца и продуктивность растительности, являются количество тепла и осадков, получаемых за вегетационный период. В связи с этим были проанализированы метеословия за годы исследования (табл. 1).

Таблица 1 – Метеорологические показатели за вегетационный период 2009-2012 гг. (г. Черногорск, Республика Хакасия; [https:// rp5.ru/](https://rp5.ru/))

Месяц	Метеорологические показатели за вегетационные периоды 2009-2012 гг.				
	среднесуточная температура, °С				
	2009	2010	2011	2012	среднее
Май	12,6	9,6	11,5	10,9	11,1
Июнь	15,9	18,2	19,5	21,2	18,7
Июль	19,9	19,5	17,7	20,4	19,4
Август	16,9	16,7	17,5	16,9	17,0
Сентябрь	9,9	10,7	9,9	11,5	10,5
Всего	15,0	14,9	15,2	16,2	15,3
	сумма среднесуточных температур, °С				
Всего	2306,3	2282,6	2328,6	2475,3	2348,2
	количество осадков, мм				
Май	14,2	18,3	37,2	51,3	30,3
Июнь	58,7	58,4	93,7	12	55,7
Июль	70,5	89,5	96,9	51,6	77,1
Август	55,8	21,7	35,6	69,6	45,7
Сентябрь	40,1	37,3	20,8	14,3	28,1
Всего	239,3	225,2	284,2	198,8	236,9

Как видно из таблицы 1, за исключением 2011 г. самым теплым месяцем являлся июль (сумма среднесуточных температур в среднем 600,8 °С, среднесуточная температура 19,4 °С). На втором месте по теплу стоял июнь (кроме 2009 г.). В целом, для июня сумма среднесуточных температур составила 560,8 °С, среднесуточная температура 18,7 °С. За четыре года исследования средняя сумма температур составила 2348,2 °С, наиболее холодным был 2010 г., самым теплым – 2012 г. В целом, за вегетационные сезоны выпало 236,9 мм осадков, причем распределялись они следующим образом: на первом месте июль (77,1 мм), на втором – июнь (55,7 мм), на третьем – август (45,7 мм), на четвертом – май (30,3 мм), на пятом – сентябрь (28,1 мм). Наибольшее количество осадков приходилось на вегетационный период 2011 г. (284,2 мм), а наименьшее наблюдали в 2012 г. (198,8 мм).

В Уйбатской степи наибольшее распространение получили черноземы. Ввиду близкого залегания девонских соленосных пород и сухого климата широкое распространение получили засоленные почвы [8]. Реакция черноземов южных, на которых расположены фитоценозы, нейтральная или слабощелочная рН 7,0-7,5, содержание гумуса в них составляет от 3 до 6%.

На территории исследования были заложены 3 стационарных площадки размером 100 м², повторность трехкратная. Первая площадка (Ф1) находилась на расстоянии 1 км от шахты (53°46'С, 91°09'В); вторая (Ф2) – 500 м от первой (53°46'С, 91°09'В); третья (Ф3) – 500 м от второй (53°47'С, 91°09'В). Концентрацию растворимых форм Pb²⁺ в образцах определяли методом сухого озоления [1], с помощью прибора «Мультитест» ИПЛ-512. Для анализа содержания свинца подготавливали водные вытяжки почвенного раствора и раствора золы из растений (подвижные формы свинца). Средние навески для анализа брали методом конверта: с верхнего слоя почвы до 20 см, в

надземной фитомассе с 10 см². Продуктивность надземной фитомассы определяли укосным методом. При описании фитоценозов на первое место ставили доминанты [6,14]. Также проводили цветной синтез спутникового снимка Landsat [5]. Обработку результатов проводили в Microsoft Office Excel.

Результаты исследования. Территория исследования находилась на южном слабопологом склоне Абаканского хребта Восточного Саяна (Уйбатская степь). Первый участок, расположенный на невысокой гряде с нарушенными малоразвитыми черноземами южными, на котором дополнительно присутствовали породы угля и мусора, с небольшими искусственными бороздами и канавами. На данном участке выявили полынный фитоценоз (Ф1) с общим проективным покрытием (ОПП) 45-50%, с доминированием *Artemisia glauca* Pall. ex Willd., *A. vulgaris* L., которые формировали первый ярус высотой 45-55 см. Второй ярус высотой 20-30 см составляли *A. jacutica* Drob., *A. frigida* Willd., *Heteropappus altaicus* (Willd.) до 5-6% проективного покрытия (ПП).

На слабопологом склоне располагался второй фитоценоз (Ф2) – колосняково-полынный с ирисом (*Leymus ramosus* L., *L. secalinus* Gzvel. – *Artemisia glauca* Pall. ex Willd., *A. jacutica* Drob., *A. scoparia* Waldst. et Kit. + *Iris biglumis* Vahl. с ОПП 50-60%. Из разнотравья также присутствовали астра алтайская, лапчатка вильчатая и др. Присутствие в данном фитоценозе длиннокорневищных доминантов – колосняков и ириса – свидетельствует о засолении чернозема южного супесчаного.

Третье растительное сообщество располагалось на слабохолмистой равнине с черноземами южными супесчаными и было представлено овсяницево-ковыльно-разнотравным фитоценозом с ОПП 70-80%. Здесь преобладали *Festuca valesiaca* Vahl., занимающая второй ярус, *Stipa capillata* L., *S. Krylovii* Roshev., относящиеся к первому ярусу (45-60 см). Основные виды разнотравья с проективными покрытиями (ПП): полынь холодная

(3-5%), полынь метельчатая (3-4%), лапчатки: бесстебельная, пижмолистная (9-10%); клоповник мусорный, икотник серозеленый, астра алтайская и др. Доля бобовых (люцерны серповидной, эспарцета песчаного, астрагала приподнимающегося) в травостое незначительна.

В целом, оценивая экологическую емкость местообитаний фитоценозов, можно сказать, что она достаточно большая, так как каждый из них имеет по 4 экогруппы. К тому же, везде модальной группой от 50 до 58,8% являлись гемиксерофиты. Кроме этого, доля ксеромезофитов увеличивалась от 18,7% в Ф1 до 22,5% в Ф3, что говорит о лугово-степном увлажнении (влажная степь). Эти данные подтвердились при обработке описаний

по экологическим шкалам. Изучаемые фитоценозы имели увлажнение: Ф1 – 47,3, в Ф2 – 48 и в Ф3 – 48,8 – лугово-степное, отклонения незначительные, поэтому сообщества по увлажнению находятся примерно в одинаковых условиях.

В мае отмечалось наибольшее увеличение содержания подвижных форм свинца в почвах, где расположены фитоценозы, что, по-видимому, связано с его просачиванием с талой водой в верхний гумусный слой почвы. Как видно из рисунка 1, максимальное количество свинца 63,5 мг/кг почвы (усредненная проба из 5 образцов почвы, взятых с глубины 0-20 см) обнаружили в Ф1, среднее значение (53,1 мг/кг) Ф2, а наименьшее в Ф3 (30,3 мг/кг).

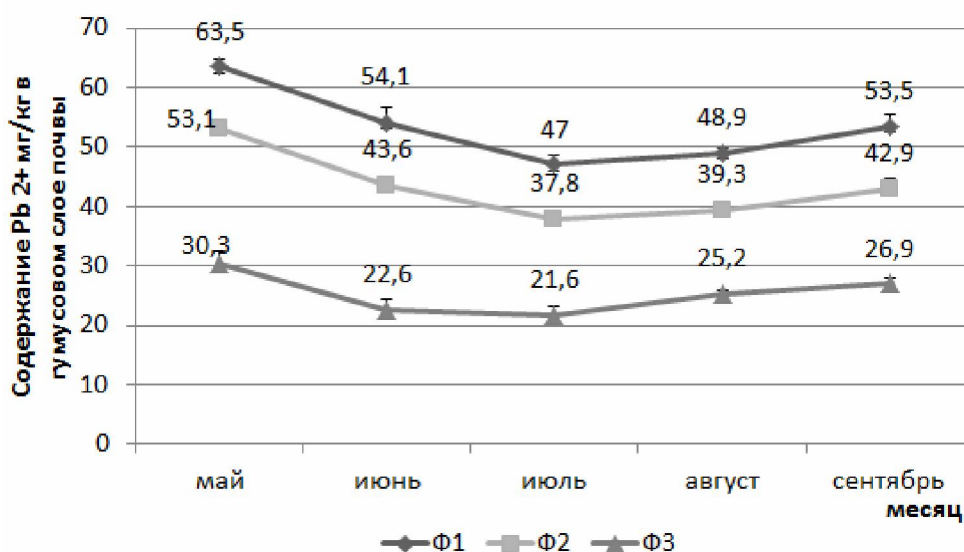


Рисунок 1 – Содержание Pb^{2+} в гумусовом слое почв исследуемых фитоценозов, мг/кг (усредненные данные за вегетационные периоды 2009-2012 гг.)

Последующее понижение концентрации металла в почве, вероятно, связано с миграцией ионов с током воды и последующей ассимиляцией их в растительном покрове, что согласуется с данными по распределению осадков в таблице 1. В сентябре при отмирании частей растений часть ионов возвращается в почву, немного повышая его концентрацию. Вероятно, данный процесс является циклическим, так как в течение 4 лет такое распределение концентрации Pb^{2+} отмечали во всех наблюдаемых сообществах (средние значения показателей получали

через суммирование данных за каждый месяц (отдельно для выделенных фитоценозов) с последующим делением на 4).

Исследования показали, что почва способна аккумулировать ионы свинца. В соответствии с нормативами [2] предельно допустимой концентрацией (ПДК) свинца в почве населенных пунктов является 32 мг/кг. Таким образом, в Ф3 содержание свинца не превышает ПДК, и данное сообщество было взято в качестве контроля. Содержание свинца в среднем за вегетационный период (рис.1) в почве составило мг/кг: Ф1 – 53,4; Ф2 – 43,3; Ф3

(контрольный) – 25,3.

За период май-сентябрь 2009-2012 гг. на первом участке (Ф1) исследуемый металл превышал ПДК в 1,7 раза, на втором (Ф2) – в 1,4 раза, а в Ф3 (контрольном) был в 1,4 раза ниже нормы (32 мг/кг против 25,3 мг/кг).

На загрязненной территории токсическое действие металлов на растения прежде всего проявляется в угнетении роста, снижении биологической продуктивности [3]. Содержание ионов свинца в сухой фитомассе возрастало в течение вегетационного периода, что, предпо-

жительно, связано с особенностями роста и развития растений и их способностью накапливать значительные концентрации тяжелых металлов (рис. 2). В мае-июне растения не способны накапливать высокие концентрации тяжелых металлов. В период массового цветения растений (июль) наблюдается увеличение массовой доли свинца в фитомассе. В сентябре с увеличением доли ветоши и мортмассы накопление свинца в них максимально (увеличивается за сезон в 1,3-1,5 раза у всех растительных сообществ).

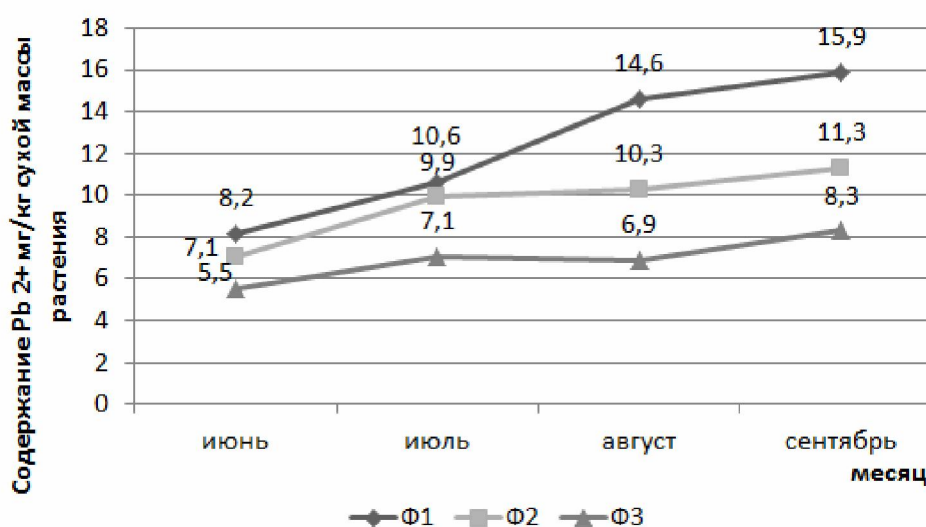


Рисунок 2 – Динамика накопления Pb²⁺ в надземной сухой фитомассе, мг/кг (среднее значение за вегетационные периоды 2009-2012 гг.)

В сене всех видов массовая доля сухого вещества должна быть не менее 83% (влаги – не более 17%). Содержание токсичных веществ в сене не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК) и максимально допустимого уровня (МДУ), установленного Департа-

ментом ветеринарии МСХ России для свинца в количестве 5,0 мг/кг корма. В среднем за сезон в надземной фитомассе содержание свинца в Ф1 составило 12,3 мг/кг, в Ф2 – 9,7 мг/кг, в Ф3 – 6,7 мг/кг сухой массы (рис. 2).

Таблица 2 – Продуктивность надземной сухой фитомассы (ц/га) в окрестностях шахты «Хакасская» в 2009-2012 гг.

Название фитоценоза	Основные ботанические группы			Продуктивность за 4 года
	злаки	полыни и разнотравье	ветошь+ мортмасса	
Ф1 – полынный	0,4	6,8	2,5	9,7±0,8
Ф2 – полосняково-полынный с ирисом	4,5	5,3	2,4	12,2±1,2
Ф3 – овсяницево-ковыльно-разнотравный	6,9	4,8	2,4	14,1±1,6

Таким образом, на обследованной территории наблюдали превышение ПДК свинца в сухой массе растений в 1,6-3 раза. Надземная фитомасса сообществ (Ф3-Ф1) накапливала поллютант в 4 раза меньше, по сравнению с почвой, что, вероятно, связано с избирательной его аккумуляцией в корневой системе.

Исследуемые сообщества используются как кормовая база для животноводства, поэтому продуктивность травостоя и его ботанический состав являются ценными показателями. Общая продуктивность фитомассы подчиняется обратной зависимости содержания металла свинца в почве (табл. 2).

В условиях разной степени загрязнения фитоценозы в силу биологических особенностей специфично накапливают свою массу. Так, полынный фитоценоз, находясь вблизи шахты, концентрирует наибольшее количество свинца в почве (средние значения составили 53,4 мг/кг) и надземной фитомассе (12,3 мг/кг), поэтому на территории с высокими дозами свинца он запасает наименьшее количество надземной фитомассы – $9,7 \pm 0,8$ ц/га.

В этом фитоценозе отмечено доминирование полыней, которые лучше, чем злаки, переносят высокие дозы свинца. Такое увеличение продуктивности полыней продолжается до определенных пределов уровня загрязнения.

В Ф2 и Ф3 запасы надземной фитомассы полыней постепенно снижаются, так как уменьшается их проективное покрытие от 40% в Ф1 до 15% в Ф2 и до 9% в Ф3. К тому же, другой видовой состав из группы разнотравья, присутствующий в Ф2 и Ф3, не может обеспечить максимального накопления продуктивности в условиях загрязнения свинцом.

В результате исследований 2009-2012 гг. изучена зависимость содержания токсиканта в фитомассе от его концентрации в почве (рис. 3). Хорошо заметны положительные корреляции между содержанием свинца в почве и надземной фитомассой растений, а также продуктивностью полыни (0,97 и 0,70 соответственно). Полыни более адаптированы к действию тяжёлых металлов, в частности из-за их способности поддерживать баланс антиоксидантной системы защиты [10].

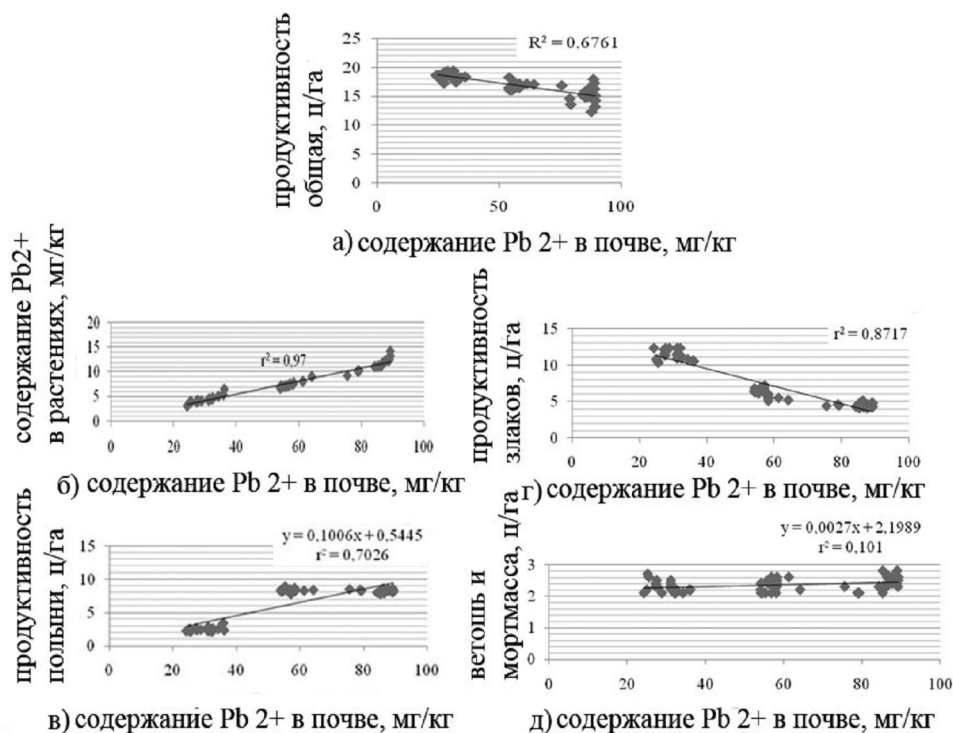


Рисунок 3 – Зависимость содержания Pb²⁺ в надземной фитомассе от его концентрации в почве, мг/кг (2009-2012 гг.)

Отрицательные корреляции наблюдали между содержанием свинца в почве и общей продуктивностью и продуктивностью злаков. Группа злаков максимально накапливала свою надземную массу при минимальных дозах свинца в Ф3 и уменьшала продуктивность при высоких дозах тяжелого металла (Ф1) в почве. В отличие от других металлов, свинец плохо проникает в лист и почти не передвигается в нем. Группа злаков накапливала в среднем за вегетационный период минимальное количество свинца – 6,4 мг/кг. Существенным барьером для проникновения свинца в лист является эпидермис и особенно кутикула: мертвые и отмирающие листья злаков накапливали в 4,5 раза больше свинца, чем живые в тех же условиях. С отмиранием резко увеличивается проницаемость тканей для воды, и становятся доступными связывающие сви-

нец природные комплексообразователи. Тяжелые металлы в высоких концентрациях подавляют рост злаков и нарушают физиолого-биохимические процессы в клетках [10]. Отмечено, что накопление ветоши и мортмассы не зависит от видового состава фитоценоза и концентрации свинца в почве. В целом, продуктивность имеет обратную зависимость от содержания металла в почве.

На рисунке 4 заметна область распространения основной массы пыли по снежному покрову от шахты, связанная с розой ветров. Как видно из рисунка 4, исследуемые фитоценозы находятся в северном направлении от шахты и здесь количество пылевых выбросов наименьшее. Следовательно, в других направлениях уровень загрязнения даже выше, чем на обследованном участке.

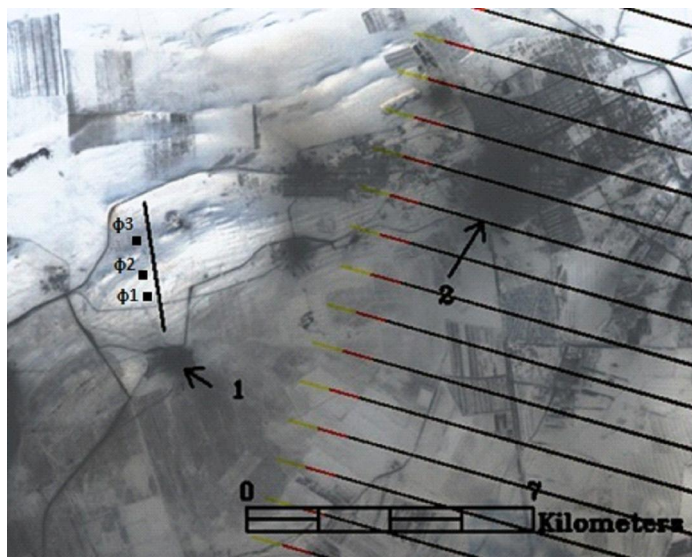


Рисунок 4 – Снимок Ландсат 7, 2.03.2009: линия обозначает направление, в пределах которого изучались фитоценозы, 1 – шахта; 2 – г. Черногорск, Ф1 – полынный фитоценоз, Ф2 – колосняково-полынный с ирисом фитоценоз, Ф3 – овсяницево-ковыльно-разнотравный фитоценоз

Выводы: 1. Степные сообщества Уйбатской степи, расположенные в окрестностях шахты «Хакасская» на черноземах южных супесчаных, испытывают загрязнение тяжелыми металлами, в частности, свинцом. Под влиянием аэротехногенного загрязнения происходит изменение степных экосистем в сторону деградации. Они теряют свойственные им признаки и превращаются в однообразные

по видовому разнообразию и структуре низкопродуктивные ценозы.

2. Почва способна аккумулировать высокие дозы свинца. В течение вегетационного периода наблюдается циклическая миграция ионов свинца в гумусовом горизонте.

3. Фитомасса растительных сообществ способна накапливать свинец в меньших концентрациях (в 4 раза) по

сравнению с почвой. Наибольшее содержание металла в полынном фитоценозе, наименьшее – в овсяницево-ковыльно – разнотравном.

4. Улучшить ситуацию с загрязнением тяжелыми металлами в районе шахты могут мероприятия по снижению уровня загрязнения и связыванию токсикантов в почвах – установка современных очистных комплексов на технологическое оборудование, рекультивация окружающей среды, пострадавшей от антропогенного фактора, в том числе высаживание растений концентраторов и удаление фитомассы с последующим захоронением. При этом необходимо осуществлять контроль за содержанием тяжелых металлов в почвах, грунтовых водах и растительности и ограничить использование фитомассы на загрязненной территории в кормоводстве.

Библиографический список

1. Викторов, Д.П. Практикум по физиологии растений [Текст] / Д.П. Викторов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. – 160с.
2. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве», утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 19 января 2006 года.
3. Горюнова, Т.А. Тяжелые металлы (Cd, Pb, Cu, Zn) в почвах и растениях юго-западной части Алтайского района [Текст] / Т.А. Горюнова // Сибирский экологический журнал. – 2001. – № 2. – С.181-191.
4. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2014 году [Текст]. – Абакан: ООО «РИЦ ОРИОН», 2015. – 201 с.
5. Жукова, Е.Ю. Комплексные исследования растительности сельскохозяйственных земель Минусинской котловины с применением спутниковых данных Landsat-7/ Е.Ю. Жукова, А.П. Шевырногов, Т.М. Зоркина, В.М. Жукова // Социально-экономические проблемы развития Саяно-Алтая: прил. к Вестнику КрасГАУ: сб. науч. Тр. Вып. 7. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т; Хакас. фил. 2011. – С. 104-106.
6. Зоркина, Т.М. Фитоценология [Текст]: учебно-методическое пособие / Т.М. Зоркина. – Абакан: Изд-во Хак. гос. ун-та им. Н.Ф. Катанова, 2003. – 48 с.
7. Ильин, В.В. Загрязнение тяжелыми металлами городских почв и культур в огородах Кузбасса [Текст] / В.В. Ильин // Агротехника. – 1991. – №7. – С.83-87.
8. Куминова, А.В. и др. Растительный покров Хакасии [Текст]. – Новосибирск, 1976. – С.309-367.
9. Ляшенко, Г.М. Загрязнение почв и растений свинцом в придорожных агроценозах чернозема обыкновенного Приазовской зоны Ростовской области: дис..... канд. с-х. наук: 06.01.03,06.01.09: защищена 18.05.2007 / Ляшенко Галина Михайловна. – пос. Персиановский, 2007. – 140 с.
10. Малеева, М.Г. Влияние тяжелых металлов на фотосинтетический аппарат и антиоксидантный статус элодеи [Текст] / Г.Ф. Некрасова, Г.Г. Борисова, Н.В. Чукина, О.С. Ушакова // Физиология растений. – 2012. – Т.59. – № 2. – С.216-224.
11. Помазкина, Л.В. Новый интегральный подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенное загрязнение почв [Текст] / Л.В. Помазкина // Успехи современной биологии. – 2004. – Т.124. – №1. – С.66-76.
12. Реутова, Н.В. Некоторые подходы к оценке мутагенного влияния отходов промышленных предприятий на окружающую среду [Текст] / Н.В. Реутова, Т.И. Воробьева, Т.В. Реутова // Генетика. – 2005. – Т.41. – №6. – С.753-758.
13. Усманова, Т.В. Оценка вклада угольных шахт в трансформацию состава природных сред (на примере шахты «Хакасская») [Текст] / Т.В. Усманова, А.В. Таловская, Т.А. Монголина, И.П. Павлов // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 4 (5). – С. 4-16
14. Цаценкин, И.А. Методические указания по экологической оценке кормовых угодий лесостепной и степной зон Сибири по растительному покрову [Текст] / И.А. Цаценкин, С.И. Дмитриева, Н.В. Беляева, И.В. Савченко и др. – М., 1974. – 247 с.
15. Ratcliffe D., Beeby A. Differential accumulation of lead in living and decaying grass on roadside verges/ D.Ratcliffe, A. Beeby/ Environ. Polut. – 1980. – ser. A. vol.23. – №4. – P.279-286.