

МЕТАЛЛЫ В ЗАГРЯЗНЕННОМ НЕФТЬЮ ТОРФЕ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

© 2011 г. Ю. Н. Водяницкий¹, А. Т. Савичев²,
С. Я. Трофимов³, Е. А. Шишконокова¹

¹*Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии,
119017, Москва, Пыжевский пер., 7*

²*Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7*

³*Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва,
Ленинские горы*

Изучение металлов в торфе, загрязненном нефтью, имеет двойное значение. Во-первых, диагностическое, как удобный и простой прием мониторинга состояния почвы, во-вторых, экологическое – для прогноза состояния торфяника, как элемента биоценоза. Все элементы-поллютанты в загрязненных торфах делятся на две группы. Одни из них (Ti, V, Cr, Ni, Zr, Ba, Y, La, Ce, Nd) накапливаются в верхнем, битуминозном слое торфа. Другие элементы (галоген хлор, а также металлы: Ca, Mn, Zn, Cu, Sr), напротив, мигрируют вглубь торфяной толщи вместе с легкими фракциями углеводородов. Для улавливания особо подвижных металлов Cu, Zn необходимо устройство искусственных геохимических барьеров, предотвращающих попадание поллютантов в грунтовые воды и открытые водоемы.

Ключевые слова: загрязнение нефтью, поллютанты, торф.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с расширением нефтедобычи увеличиваются площади почв, загрязненных при аварийных разливах нефти, особенно в местах ее добычи (Пиковский и др., 2003; Геннадиев, Пиковский, 2007). В России центр нефтедобычи перемещается на север в зону повышенного увлажнения, где распространены торфяные почвы. На участках аварийных разливов образуются обширные безжизненные площади. Данные о величине площадей нефтезагрязненных земель разнятся. В Ханты-Мансийском автономном округе загрязненные площади занимают тысячи гектар (Трофимов, 2007).

В районе Средней Оби максимально загрязнен Нижневартовско-Самотлорский промышленный узел, где сосредоточены основные нефтяные разработки Западной Сибири.

Нефть – это жидкий природный раствор, состоящий из большого числа углеводородов разного строения и высокомолекулярных смолисто-асфальтовых веществ. В нефти растворено некоторое количество воды, солей и микроэлементов. Углеводороды нефти подразделяются на три класса: 1) парафины (алканы) – насыщенные соединения с прямой или разветвленной цепью; 2) нафтены (циклоалканы) – насыщенные циклические соединения; 3) ароматические (арены) – ненасыщенные циклические соединения (Орлов и др., 2002). В метано-нафтеновой нефти содержится алканов 40–55%, циклоалканов 35–45%, аренов 5–10%; в метано-нафтеново-ароматической – алканов 20–40%, циклоалканов 45–60%, аренов 10–35% (Орлов и др., 2002). Токсичность углеводородов увеличивается в том же порядке. Твердые метановые углеводороды (парафины) – не токсичны для живых организмов, но прочно запечатывают все поры, лишая почву кислорода. О токсичности нафтенов сведений почти нет. Наиболее токсичны ненасыщенные ароматические углеводороды (арены).

Состав разлитой нефти резко фракционирует. В верхних горизонтах сорбируются высокомолекулярные фракции: смолы и асфальтены, а в нижние горизонты и грунтовые воды проникают низкомолекулярные соединения, растворимые в воде. Кольматирование верхних горизонтов наряду с поступлением легкоокисляемых фракций ведет к активизации оgleения переувлажненной почвы. В местах добычи загрязнение почв нефтью осложняется выбросами минерализованных промысловых стоков, буровых растворов, шламов и других химически активных компонентов.

Главные элементы в нефти: углерод (83–87%), водород (12–14%), азот, сера, кислород (1–2%). Содержание других элементов низкое, хотя общее число их достигает 40–50, среди них преобладают металлы: более 30 элементов. Среди них ванадий V, никель Ni, железо Fe, кобальт Co, свинец Pb, медь Cu, уран U, мышьяк As, ртуть Hg, молибден Mo и др. (Перельман, Касимов, 1999). Часть металлов в нефти находится в виде солей органических кислот и хелатных комплексов, в которых атом металла расположен в центре порфиринового цикла (это относится к Fe^{2+} , VO^{2+} , Ni^{2+})

или в пустотах конденсированных фрагментов. Ванадий, никель, железо концентрируются в асфальтено-смолистых веществах (Перельман, Касимов, 1999). Другие металлы находятся в форме сложных полидентантных комплексов. Многие из этих комплексов вступают в ионный обмен с металлами в растворах или на поверхности пород, контактирующими с нефтью, что обогащает металлами добытую нефть. Очевидно, повышенное содержание металлов в почве может служить критерием ее загрязнения нефтью и сопутствующими компонентами.

Важно подчеркнуть, что с течением времени органические компоненты нефти окисляются, и их доля в почве уменьшается (иногда слишком медленно). Но тяжелые металлы, если они не вымываются и не поступают в водотоки и водоемы, могут ингибировать растительность неопределенно долго. Таким образом, изучение металлов в торфе, загрязненном нефтью, имеет двойное значение. Во-первых, диагностическое как удобный и простой прием мониторинга состояния загрязненной почвы, во-вторых, экологическое – для прогноза состояния торфяника, как элемента биоценоза.

Цель работы: использовать рентгенофлуоресцентный анализ для определения содержания металлов в торфе, загрязненном нефтью, и проверить его эффективность на примере загрязненного олиготрофного торфа из Среднего Приобья.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Образцы торфа отбирали на территории одного из нефтяных месторождений в восточной части Среднеобской низменности, в зоне средней тайги. Отличительная особенность болот таежной зоны Западной Сибири – абсолютное доминирование (более 90%) биогеоценозов верхового (олиготрофного) типа (Аветов, Шишкова, 2010). Среди них распространены сосново-кустарничково-сфагновые (рямы), грядово-мочажинные и озерково-грядово-мочажинные болота.

Загрязненный торф отбирали на участке олиготрофного грядово-мочажинного комплекса. Нефть разлилась 10–15 лет тому назад. Загрязненный участок включает мочажину и гряду.

Мочажина находится в 20–30 м от ветки трубопровода. Нефть разлилась по пониженной, центральной части мочажины. На 20%

ее площади, на периферии разлива растительность восстановилась, поселилась пушица рыжеватая, клюква болотная, есть куртины пушицы многоколосковой, на увлажненных участках появились сфагновые мхи. Но значительная часть разлива по-прежнему покрыта битумной коркой и лишена растительности.

Гряда расположена в 3–5 м от ветки трубопровода. На части площади растительность полностью выпала на месте, более удаленном от источника разлива (и более возвышенном), сохранились отдельные экземпляры пушицы влагалищной, вересковых кустарничков, морошки.

Образцы торфа отбирали буром из четырех точек с разным загрязнением с глубин 0–20, 20–70 и 70–100 см. В центре разлива (разр. 2), на гряде (разр. 3), на периферии разлива (разр. 4) и на границе разлива (разр. 5). Здесь же определяли общее проективное покрытие растительности (ОПП).

Разр. 2 – центр разлива. На поверхности сплошная битумизированная корка. ОПП = 0%.

Разр. 3 – гряда. Высота 40–50 см. ОПП = 0%. Поверхность покрыта битумизированной коркой.

Разр. 4 – периферия разлива в 15 м от центра разлива. Центр мочажины. На поверхности битумизированная корка. ОПП = 10%. Растет пушица рыжеватая, есть отдельные экземпляры клюквы болотной. Растительность сильно угнетена, генеративные органы не развиты.

Разр. 5 – условный фон, граница разлива. Краевая часть мочажины, примыкающая к гряде в 15–20 м от периферии разлива. Следов загрязнения нефтью не обнаружено. В травяно-кустарничковом ярусе (где ОПП = 10%) доминирует пушица рыжеватая. Моховой покров (где ОПП = 100%) представлен сфагновыми мхами с примесью зеленых. По сравнению с ненарушенными фоновыми участками здесь отмечается как обеднение видового состава, так и инвазия видов, не свойственных олиготрофным болотам: обилие пушицы рыжеватой и появление зеленых мхов, характерных для низинных болот, указывает на рост трофности болота.

Поскольку концентрация металлов в торфе низка, его озоляли. Озоление торфа проводили в муфельной печи при температуре

450°C до постоянной массы. Содержание золы в торфе низкое: от 1.8 до 5.2%.

Содержание химических элементов в золе торфа определяли рентгенофлуоресцентным методом на приборе «Респект». На нем же определяли содержание редкоземельных металлов La и Ce рентгенорадиометрическим способом (Savichev, Vodyanitskii, 2009). В минеральных почвах определение ванадия рентгенофлуоресцентным методом невозможно из-за искажающего влияния высокого содержания титана. Его определение ограничивается двумя факторами. Во-первых, содержанием ванадия, так как при времени накопления спектра 350–400 с его можно обнаружить при содержании свыше 100 мг/кг. Во-вторых, перекрытием линий VK_{α} и TiK_{β} . Экспериментально измеренное соотношение интенсивностей линий $TiK_{\beta} : TiK_{\alpha}$ в почвах составляет 0.14 ± 0.03 , причем разброс значений обусловлен матричным эффектом. Надежные интенсивности линий VK_{α} можно получить только при соотношении ванадия и титана: $V > 0.06 Ti$. Почти во всех минеральных почвах это неравенство не выполняется. Но в золе загрязненных торфов, благодаря высокому содержанию, диагностика ванадия становится возможной, хотя только при его содержании свыше 500 мг/кг. Это позволило нам определить содержание ванадия в пяти образцах золы торфа.

Для оценки характера перераспределения тяжелых металлов/металлоидов в профиле сопоставляли их содержание в верхнем и нижнем слоях торфа. Степень аккумуляции элементов (%) в верхнем слое торфа 0–20 см (R_v) почв определяли по формуле:

$$R_v = 100 \cdot [(Me_{0-20} : Me_{70-100}) - 1] : (Me_{0-20} : Me_{70-100});$$

а в нижнем слое 70–100 см (R_n) по формуле:

$$R_n = 100 \cdot [(Me_{70-100} : Me_{0-20}) - 1] : (Me_{70-100} : Me_{0-20}).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Геохимическая классификация элементов. Химические элементы подразделяются на группы в зависимости от электронного строения атомов. Самый низкий – *s*-подуровень, затем идут *p*-, *d*- и *f*-подуровни, при этом *p*- и *d*-элементы делятся на главные и редкие. Все *s*-элементы относятся к главным, а все *f*-элементы – к редким. Тип подуровней электронов определяет реакционную способность химических элементов. По структуре активного элек-

тронного слоя элементы делятся на три блока. Блок I включает *s*- и *p*-элементы, блок II – переходные *d*-элементы, блок III – редкие *f*-элементы (Иванов, 1994–1997). Соответственно, в табл. 1 объединено содержание в золе торфов *s*- и *p*-элементов, в табл. 2 – показано содержание *d*-элементов, в табл. 3 – редких *f*-элементов.

Зольность торфа. На границе разлива, где произрастает растительность и общее проективное покрытие ОПП = 100%, зольность поверхностного слоя минимальная, а с глубиной она возрастает. Напротив, в центре и на периферии разлива нефти, а также на гряде, где растительность угнетена или вообще отсутствует, ОПП = 0–10%, зольность поверхностного слоя максимальна, а с глубиной она снижается. Вероятно, повышенная зольность верхнего безжизненного слоя торфа отражает его загрязненность, не только тяжелыми фракциями нефти, но минеральными компонентами.

Закономерности перераспределения тяжелых металлов/металлоидов в профиле торфа. Обнаружено, что все элементы-поллютанты в загрязненных торфах делятся на две группы (табл. 4). Одни из них накапливаются в верхнем, битуминозном слое торфа. Другие, напротив, легко мигрируют вглубь вместе с легкими фракциями углеводов. Чтобы отделить элементы-биофилы, профильное распределение которых определяется обилием растительности, от элементов-поллютантов был проведен корреляционный анализ связи ОПП с содержанием элементов в поверхностном слое загрязненного торфа.

Элементы-поллютанты, закрепленные битумами в верхнем слое торфа, отрицательно связаны с ОПП. То есть их накопление коррелирует со степенью битуминозности поверхности, что не позволяет торфу зарастать. Но те элементы, которые хотя и накапливаются в верхнем слое торфа, но прямо связаны с ОПП, нельзя рассматривать как поллютанты, это биофилы (для калия $r = 0.99$, для фосфора $r = 0.96$). К группе металлов-поллютантов, закрепленных в верхнем, битуминозном слое торфа, относятся титан, ванадий, хром, никель, цирконий, барий и лантаниды.

Для второй группы элементов, мигрирующих вглубь торфяного профиля, также был выполнен корреляционный анализ связи ОПП с содержанием элементов в верхнем слое загрязненного торфа. Эти элементы-поллютанты положительно связаны с ОПП, т.е.

Таблица 1. Содержание *s*- и *p*-элементов в золе торфов, загрязненных нефтью

№ образца	Глубина, см	%										мг/кг									
		ОПП	Зола	K ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Rb	Ba	Sr	Ga	As	Pb				
Разр. 2. Центр разлива																					
4	0–20	0	2.8	1.66	1.55	3.79	14.59	63.06	3.11	3.95	0.01	39	549	912	13	22	107				
5	20–70		1.8	1.03	1.89	9.75	11.99	44.52	5.71	8.14	0.01	31	571	2739	14	23	97				
6	70–100		1.9	0.85	2.28	10.51	10.87	36.88	4.85	7.02	0.23	25	385	2022	12	22	47				
Разр. 3. Гряда																					
10	0–20	0	5.2	1.70	1.67	3.97	9.43	64.78	1.93	4.49	0.01	39	682	617	5	5	39				
11	20–70		3.8	1.05	1.39	6.60	10.89	49.53	4.16	5.86	0.02	27	313	517	12	13	27				
12	70–100		1.8	1.34	1.33	5.26	12.85	59.58	3.84	5.10	0.12	34	233	517	11	8	34				
Разр. 4. Периферия разлива																					
1	0–20	7	2.6	1.42	1.47	5.31	7.82	52.57	3.31	7.76	0.01	39	641	1414	15	17	81				
2	20–70		3.5	1.17	1.57	9.60	8.63	38.58	2.61	9.10	0.79	31	351	1482	7	16	96				
3	70–100		3.1	0.93	0.96	10.75	8.57	33.08	2.38	7.88	1.16	37	367	1960	6	14	90				
Разр. 5. Граница разлива																					
7	0–20	100	2.8	4.47	1.86	10.16	5.94	37.62	6.28	4.64	0.40	62	439	2935	8	17	106				
8	20–70		5.0	1.29	0.99	9.20	8.35	45.29	2.80	7.04	0.27	39	422	1620	7	12	100				
9	70–100		3.3	0.91	1.73	13.70	9.20	32.75	3.30	9.17	0.45	31	399	2067	12	15	84				

Таблица 2. Содержание *d*-элементов в золе торфов, загрязненных нефтью

№ образца	Глубина, см	ОПП	Зола	%					мг/кг					
				Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Mn	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Zr	Nb	
Разр. 2. Центр разлива														
4	0-20	0	2.8	2.24	1.08	256	213	164	315	28	94	218	10	
5	20-70		1.8	2.57	0.82	496	900	62	94	85	387	80	8	
6	70-100		1.9	2.57	0.72	550	-	82	81	55	369	45	-	
Разр. 3. Гряда														
10	0-20	0	5.2	3.53	0.78	387	106	82	268	17	69	617	6	
11	20-70		3.8	2.69	0.72	550	-	75	78	76	402	517	9	
12	70-100		1.8	1.97	0.88	287	-	41	94	73	231	517	8	
Разр. 4. Периферия разлива														
1	0-20	7	2.6	3.27	0.93	488	129	48	459	8	134	174	7	
2	20-70		3.5	1.80	0.52	403	560	116	40	39	300	72	4	
3	70-100		3.1	2.34	0.64	705	-	137	48	42	665	80	-	
Разр. 5. Граница разлива														
7	0-20	100	2.8	3.54	0.61	159	-	82	46	37	381	69	-	
8	20-70		5.0	2.41	0.73	487	6	20	34	42	213	182	5	
9	70-100		3.3	2.89	0.63	736	-	75	38	49	477	86	6	

Таблица 3. Содержание редких *f*-элементов в золе торфов, загрязненных нефтью

№ образца	Глубина, см	ОПП	Зола	%					мг/кг		
				Y	La	Ce	Pr	Nd	Ce/La		
Разр.2. Центр разлива											
4	0-20	0	2.8	17	34	16	3	5	0.47		
5	20-70		1.8	19	9	10	2	5	1.11		
6	70-100		1.9	11	5	7	-	4	1.40		
Разр.3. Гряда											
10	0-20	0	5.2	17	13	17	3	8	1.31		
11	20-70		3.8	15	9	11	2	5	1.22		
12	70-100		1.8	16	8	10	3	6	1.25		
Разр. 4. Периферия разлива											
1	0-20	7	2.6	15	9	10	2	5	1.11		
2	20-70		3.5	11	5	5	-	2	1.0		
3	70-100		3.1	11	5	7	-	3	1.4		
Разр.5 Граница разлива											
7	0-20	100	2.8	9	6	9	2	4	1.5		
8	20-70		5.0	13	9	10	3	5	1.11		
9	70-100		3.3	16	5	7	2	4	1.4		

Таблица 4. Показатели накопления элементов в верхнем R_в и нижнем R_н слоях торфов, загрязненных нефтью, %

№ образца	ОПП	Верхний слой R _в										Нижний слой R _н							
		Ti	V	Cr	Ni	Zr	Ba	Y	La	Ce	Nd	сред-нее	Cl	Ca	Mn	Cu	Zn	Sr	сред-нее
5	100	0	Нет	8	17	0	9	0	17	22	0	8	11	26	0	24	20	2	65
2	0	33	86	50	74	79	30	35	85	56	20	55	96	64	53	49	74	55	44
3	0	0	72	50	65	16	66	6	38	41	25	38	92	24	0	77	70	0	62
4	7	31	77	0	89	54	43	27	44	30	40	43	99	51	31	81	80	28	47
Среднее (разр. 2-4)		21	78	33	76	50	46	23	56	42	28	28	96	46	28	69	75	28	53
r (ОПП)*		-0.79	-0.80	-0.21	-0.85	-0.59	-0.85	-0.98	-0.54	-0.70	-0.60		0.99	0.99	0.99	0.72	0.99	0.88	

* Коэффициент корреляции между содержанием элемента и общим проективным покрытием (ОПП).

их перемещение вниз положительно сказывается на зарастании поверхности торфа. В то же время элементы, накапливающиеся в нижнем слое торфа, но отрицательно связанные с ОПП, нельзя рассматривать как поллютанты, это биофилы (для серы $r = -0.15$) или малоопасный алюминий ($r = -0.66$). К группе лабильных элементов-поллютантов относятся хлор, кальций, марганец, медь, цинк и стронций.

Обращает на себя внимание высокие показатели накопления металлов в верхнем слое торфе в зоне разлива, в разр. 2–4, где ОПП = 0–7%, в среднем $R_v = 38–55\%$. На границе разлива в разр. 5, где ОПП = 100%, накопление тех же металлов более скромное: в среднем $R_v = 8\%$. Следовательно, металлы-битумофилы локализируются в области сильного загрязнения нефтью.

Масштабное перемещение лабильных металлов также ограничено зоной сильного загрязнения. В разр. 2–4 их накопление на глубине 100 см достигает в среднем $R_n = 44–65\%$. На границе разлива в разр. 5, глубинное накопление тех же металлов значительно слабее: в среднем $R_n = 14\%$. Впрочем, миграция некоторых из них вполне ощутима и на границе разлива: значение R_n для кальция составляет 26%, для меди – 24%, для цинка – 20%.

Самое сильное загрязнение металлами/металлоидами приходится на центр разлива нефти, затем следует периферия разлива и затем уже гряда. Примечательно, что на гряде, где ОПП = 0%, загрязненность металлами/металлоидами ниже, чем на периферии разлива, где ОПП = 7%. Вероятно, это связано с тем, что верхний слой торфа на гряде обогащен более токсичными металлами (хромом и барием) и обеднен малотоксичными титаном, цирконием, иттрием, лантаном.

Перераспределение s-элементов. Рассмотрим поведение кальция, стронция и бария. Их константы устойчивости с органическими лигандами изменяются в таком порядке: $Ca^{2+} > Sr^{2+} > Ba^{2+}$ (Дятлова и др., 1988). Понятно, что кальций и стронций, прочно закрепляемые органическими лигандами, мигрируют вглубь толщи торфа, а менее прочно связанный барий закрепляется асфальтенами в поверхностном слое торфа.

Перераспределение d-элементов. К ним относятся ванадий, хром, марганец, цинк, никель, медь. Именно в таком порядке возрастают их константы устойчивости при образовании комплексов.

Хотя положение цинка может меняться в зависимости от типа комплексона: его связи могут быть прочнее никеля (Дятлова и др., 1988). Можно предположить, что металлы в начале этого ряда накапливаются в верхнем слое торфа, загрязненном асфальтенами, а металлы в конце ряда – в нижнем слое торфа. В целом это правило соблюдается, хотя есть одно исключение. Фактически в верхнем слое торфа, обогащенном асфальтенами, накапливаются ванадий и хром, что согласуется с их относительно низкой прочностью связи с комплексонами. Но, кроме того, в верхнем слое накапливается никель, с высокой прочностью связи с комплексонами. Причина этого в том, что Ni входит в состав порфиринов нефти, где он закреплен прочно и вместе с ними остается в составе асфальтенов. Подчеркнем, что ванадий и никель относятся к наиболее сильным битумофилам: для них показатель R_v достигает 78–76%.

Остальные d-металлы: марганец, цинк и медь, образуя прочные связи с комплексонами, мигрируют с ними в глубину толщи торфа. Два из них (медь и цинк) относятся к наиболее подвижным поллютантам, уступая в этом отношении только галогену хлору; в зоне загрязнения у этих металлов показатель миграции R_n достигает 69–75%.

Перераспределение f-элементов. Они представлены лантанидами: иттрием, лантаном, церием, празеодимом, неодимом. Содержание празеодима в золе торфа очень низко 2–3 мг/кг, что не позволяет выявить особенности его профильного распределения. Но все остальные лантаниды аккумулируются в поверхностном слое загрязненных торфов, при этом связь их содержания в данном слое с ОПП отрицательная.

Лантаниды образуют самые разнообразные комплексы, что затрудняет прогноз о прочности их связи с комплексонами (Дятлова и др., 1988). Из наших данных следует, что все лантаниды накапливаются в верхнем, асфальтеновом слое торфа.

Хотя есть и различия в поведении лантанидов. Зола торфа сильно обогащена La относительно Ce, особенно на поверхности в центре разлива нефти, где $Ce/La = 0.47$, вместо кларкового 1.9 (Гринвуд, Эрншо, 2008). На глубине 40 см отношение Ce/La возрастает до 1.11, а на глубине 100 см до 1.4. Примерно та же картина и на периферии разлива: здесь на поверхности отношение Ce/La равно 1.11, а на глубине 1 м оно увеличивается до 1.4. Объ-

ясняется это тем, что Се в восстановительной среде мигрирует вглубь гораздо сильнее, чем La. В силу повышенной мобильности, Се может поступать в большем количестве в грунтовые воды и открытые водоемы, при этом токсичность Се выше, чем La.

Поскольку поведение металлов-поллютантов первой группы связано с процессом окисления битума, то их присутствие в торфе можно рассматривать как долговременное. Напротив, опасность элементов-поллютантов второй группы связана с их возможностью попадания в водоемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение металлов в торфе загрязненном нефтью, имеет двойное значение. Во-первых, диагностическое, как удобный и простой прием мониторинга состояния загрязненной почвы, а во-вторых, экологическое – для прогноза состояния торфяника, как элемента биоценоза.

Установлена эффективность рентгенофлуоресцентного анализа определения содержания металлов в золе торфа, загрязненного нефтью. С применением этого метода получены важные результаты. Обнаружено, что все элементы-поллютанты в загрязненных торфах делятся на две группы. Одни из них ($n = 10$) накапливаются в верхнем, битуминозном слое торфа. Это металлы-поллютанты: титан, ванадий, хром, никель, цирконий, барий и лантаниды. Их содержание зависит от скорости окисления битумов в верхнем слое торфа. Другие элементы ($n = 6$), напротив, мигрируют вглубь торфяной толщи вместе с легкими фракциями углеводов и комплексонами. Ко второй группе лабильных элементов относятся хлор, кальций, марганец, цинк, медь и стронций. Для улавливания особенно подвижных (Ca, Cu, Zn) необходимо устройство искусственных геохимических барьеров, предотвращающих попадание поллютантов в грунтовые воды и открытые водоемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветов Н.А., Шишконокова Е.А.* Нефтяное загрязнение болот Западной Сибири // *Природа*. 2010. № 11. С. 14–24.

2. *Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И.* Карты устойчивости почв к загрязнению нефтепродуктами и полициклическими ароматическими углеводородами: метод и опыт составления // *Почвоведение*. 2007. № 1. С. 80–92.
3. *Гринвуд Н., Эрншо А.* Химия элементов. М.: Бином, 2008. Т. 2. 670 с.
4. *Дятлова Н.М., Темкина В.Я., Попов К.И.* Комплексоны и комплексоны металлов. М.: Химия, 1988. 544 с.
5. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. М.: Недра – Экология. Т. 1–6. 1994–1997.
6. *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н.* Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высшая школа, 2002. 334 с.
7. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Астrea-2000, 1999. 762 с.
8. *Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Сахаров Г.Н.* Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // *Почвоведение*. 2003. № 9. С. 1132–1140.
9. *Трофимов С.Я.* Актуальные проблемы рекультивации нефтезагрязненных почв таежной зоны Западной Сибири // *Современные проблемы загрязнения почв*. Сб. мат-лов II Междунар. науч. конф. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. Т. 1. С. 36–37.
10. *Savichev A.T., Vodyanitskii Yu.N.* Determination of barium, lanthanum and cerium contents in soils by the X-ray radiometric method // *Eurasian Soil Science*. 2009. V. 42. № 13. P. 1461–1469.