

О.Г. Савичев, П.В. Бернатонис, В.К. Бернатонис

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ БУРЕНИЯ В ТОРФЯНО-БОЛОТНЫХ ГЕОСИСТЕМАХ СИБИРИ

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
(проект р_ОФИ «Моделирование и прогноз изменения состояния водных объектов
при планируемой разработке железорудных месторождений на заболоченных территориях Томской области»).*

На основе данных геохимических исследований, выполненных авторами в 1998–2013 гг., получена общая характеристика химического состава отходов бурения в районах размещения объектов нефтегазодобычи на заторфованных территориях Западной и Восточной Сибири. Выполнено термодинамическое моделирование изменения химического состава амбарных вод. Показано, что в течение нескольких лет возможно снижение суммарного содержания растворённых солей только за счёт взаимодействия в системе «вода – порода» примерно на 40%. Выработаны рекомендации по использованию отходов бурения для рекультивации нарушенных участков торфяных болот.

Ключевые слова: отходы бурения; шламовые амбары; торфяные болота; химический состав; Сибирь.

В процессе добычи нефти и газа в наземные и водные экосистемы попадает значительное количество загрязняющих веществ, в том числе с отходами бурения, основная часть которых складывается в шламовых амбарах. Последние объекты часто размещены в пределах торфяных болот, характеризующихся дефицитом целого ряда веществ, что ограничивает развитие лесных (неболотных) фитоценозов. В то же время они в избытке содержатся в отходах бурения. Это и определяет актуальность исследований условий их размещения и утилизации в болотных экосистемах региона.

Исследование является продолжением работы [1] и выполнено на основе данных Томского политехнического университета (ТПУ), Томского государственного университета (ТГУ), ОАО «Томскгеомониторинг», ОГУ «Облкомприрода» (г. Томск), полученных при участии авторов в 1998–2013 гг. совместно с В.А. Базановым, В.С. Архиповым и другими и частично опубликованных в [1–5]. Кроме того, использовались данные других авторов [6, 7]. Объектами исследования послужили нефтяные и газовые промыслы в Томской, Тюменской областях и Красноярском крае, расположенные в пределах торфяных болот. Методика полевых и лабораторных работ приведена в [1, 2], а термодинамических расчётов и моделирования – в [8].

Обобщение неопубликованных данных авторов и материалов [1–7] показало, что субстрат, сбрасываемый в шламовые амбары нефтегазовых месторождений, по сравнению с торфами исследуемых районов, содержит значительное количество нефтепродуктов, сульфатов, хлоридов и ряд других веществ (табл. 1). Заметно выше (относительно болотных вод) содержание указанных веществ и в амбарных водах (табл. 2). С одной стороны, это свидетельствует о значительном отклонении состава отходов бурения от состояния окружающей природной среды, особенно болотных экосистем. С другой стороны, состояние самих болот кардинально отличается от соответствующих показателей лесных фитоценозов, являющихся, с антропоцентрической точки зрения, более важным природным объектом и ресурсом, использование которого возможно как в хозяйственном, так и рекреационном отноше-

нии. В целом, с учётом огромных масштабов болотных процессов и продолжающегося интенсивного заболачивания равнинных территорий в Сибири [9], вопрос о направлениях охраны и использования болот региона является весьма неоднозначным.

Сравнение данных о химическом составе твёрдого вещества и жидкости в шламовых амбарах, минеральных почв, торфов и болотных вод позволяет предположить, что твёрдые и жидкие отходы бурения вполне пригодны для использования при рекультивации нарушенных участков болот. Этот парадоксальный, на первый взгляд, вывод определяется тем, что в отходах бурения находятся более высокие, чем в торфах и болотных водах, количества кальция, магния, калия и соединений азота, необходимых для нормального функционирования неболотных фитоценозов. Однако есть и определённые проблемы, связанные с повышенным содержанием в отходах натрия и хлоридов, негативно влияющих на развитие растительности. Наиболее оптимальный по эффективности и себестоимости подход к решению этого вопроса заключается в смешении отходов бурения, торфов (включая загрязнённые), хозяйственно-бытовых стоков с повышенным содержанием биогенных веществ и негашёной извести. Это позволит, с одной стороны, снизить концентрации не только натрия и хлоридов, но и целого ряда токсичных микроэлементов и органических кислот, а с другой – увеличить содержание биогенных веществ.

При этом необходимо отметить, что, несмотря на значительное содержание в амбарных водах растворённых солей, они остаются недосыщенными относительно первичных алюмосиликатов (табл. 3). В то же время амбарные воды пересыщены относительно карбонатных минералов и гуматов металлов, что обуславливает потенциальную возможность снижения концентраций некоторых веществ в течение того или иного времени. Для подтверждения этой гипотезы было выполнено термодинамическое моделирование изменения химического состава амбарных вод в направлении достижения минимума энергии Гиббса системы «вода – порода» с помощью программного комплекса Solution+. Полученные при этом результаты свидетельствуют о ключевой роли карбонатного барьера, определя-

ющего постоянное выведение из раствора кальцита и доломита (табл. 3). Осаждаться будут также глинистые минералы и гуматы ряда металлов, следствием чего станет снижение концентраций макрокомпонентов в амбарных водах примерно на 40% даже при отсутствии специальных воздействий (табл. 4). При наличии последних, особенно в

части принудительной коагуляции взвешенных веществ, следует ожидать дополнительного снижения концентраций растворённых и взвешенных веществ. Образующийся при этом осадок целесообразно смешивать с другими компонентами окружающей среды и сточными водами с целью усреднения их химического состава.

Таблица 1

Средний химический состав отходов бурения, минеральных почв и торфов в районах размещения объектов нефтегазодобычи

Показатель	Отходы бурения		Торф		Минеральные почвы	
	A	δ_A	A	δ_A	A	δ_A
pH _(в.в.)	7,77	0,22	4,75	0,30	6,06	0,18
Ca ²⁺ _(в.в.) , ммоль/100 г	123,4	101,8	67,0	12,7	20,9	4,7
Mg ²⁺ _(в.в.) , ммоль/100 г	46,6	41,6	26,3	4,0	1,7	0,5
SO ₄ ²⁻ _(в.в.) , мг/кг	3 194,8	2 904,5	80,4	33,6	22,2	5,0
Cl _(в.в.) , мг/кг	228,1	214,9	123,1	48,1	25,9	6,2
NO ₃ _(в.в.) , мг/кг	28,79	7,53	19,10	18,10	4,35	1,33
Органическое вещество, %	10,6	8,8	47,2	11,4	4,6	0,7
Нефтепродукты, мг/кг	29 791,6	9 345,1	1056,6	265,7	111,2	24,5
P, мг/кг	173,1	24,6	385,4	179,8	440,1	81,1
K, мг/кг	328,6	26,7	–	–	122,8	30,5
Ca, мг/кг	–	–	5895,0	1119,0	–	–
Cr, мг/кг	33,3	10,0	38,0	16,2	84,9	16,4
Mn, мг/кг	221,7	113,7	824,5	584,4	1068,1	206,3
Fe, мг/кг	–	–	17 385,0	6 469,9	38 520,4	5 323,5
Cu, мг/кг	57,9	27,1	9,6	3,3	23,9	5,2
Zn, мг/кг	174,4	80,7	21,3	5,7	31,7	6,6
As, мг/кг	3,8	0,8	1,8	1,0	2,4	0,4
Cd, мг/кг	0,8	0,2	0,2	0,1	0,1	<0,1
Pb, мг/кг	85,0	50,9	8,5	1,1	7,5	1,0

Примечания. в.в. – результат определения состава водной вытяжки; A – среднее арифметическое; δ_A – погрешность определения среднего арифметического, $\delta_A = \sigma \cdot N^{-0,5}$, где N – объём выборки, σ – среднее квадратическое отклонение. Обобщение выполнено по неопубликованным данным авторов и материалам [1, 2, 4, 6, 7]; торф опробовался в районе размещения объектов нефтегазодобычи, его тип преимущественно низинный и переходный; прочерк – нет данных.

Таблица 2

Средний химический состав вод шламовых амбаров, сточных и болотных вод, мг/дм³

Показатель	Шламовые амбары		Хозяйственно-бытовые стоки		Олиготрофные болота		Мезотрофные болота		Евтрофные болота	
	A	δ_A	A	δ_A	A	δ_A	A	δ_A	A	δ_A
pH	8,00	0,59	7,59	0,06	4,38	0,26	5,05	0,37	5,81	0,24
Преобладающие ионы	Cl – Na		C – (Na, Ca)		C – Ca		C – Ca		C – Ca	
$\Sigma_{гн}$	7 211,8	1 436,7	830,8	79,3	52,9	85,3	109,3	343,1	222,6	39,5
Ca ²⁺	248,4	115,1	68,6	6,7	12,4	2,5	21,9	6,6	34,9	7,8
Mg ²⁺	31,8	7,7	18,7	3,3	4,7	0,8	7,5	1,9	9,0	1,8
Na ⁺	2 124,8	1 344,1	82,2	13,0	2,5	1,1	1,9	1,4	13,0	7,0
K ⁺	202,2	142,7	11,6	1,6	0,8	0,3	0,6	0,4	2,0	0,4
HCO ₃ ⁻	338,3	106,1	536,4	21,8	23,1	8,9	70,9	30,2	149,3	38,0
CO ₃ ²⁻	3,8	2,3	–	–	–	–	–	–	–	–
SO ₄ ²⁻	388,1	313,3	34,1	3,8	7,0	2,0	3,3	1,5	5,1	1,8
Cl ⁻	3 874,4	2291,8	79,2	9,3	2,4	0,3	3,2	0,5	9,3	3,7
NO ₃ ⁻	4,96	1,72	2,57	0,42	0,27	0,13	0,07	0,04	0,11	0,03
NO ₂ ⁻	0,026	0,017	0,247	0,045	0,007	0,002	0,010	0,003	0,005	0,002
NH ₄ ⁺	1,60	0,54	45,54	3,68	1,16	0,26	0,94	0,34	1,65	0,30
PO ₄ ³⁻	0,68	0,30	4,68	0,71	0,12	0,07	0,21	0,16	0,48	0,16
Si	7,32	2,03	11,71	1,57	1,26	0,25	3,40	1,52	4,15	0,74
Б.О.	364,69	57,61	278,10	60,55	322,13	52,53	307,88	151,55	228,51	50,59
Нефтепродукты	0,511	0,108	1,579	0,546	0,189	0,074	0,128	0,081	0,157	0,053
Fe	19,277	11,740	2,852	0,459	1,185	0,168	3,539	1,579	8,530	2,977
Cu	0,0072	0,0046	0,0059	0,0010	0,0016	0,0003	0,0021	0,0013	0,0048	0,0033
Zn	0,0336	0,0170	0,0116	0,0028	0,0093	0,0024	0,0060	0,0018	–	–
Pb	0,0004	0,0004	0,0150	0,0021	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	–	–

Примечания. Здесь и далее $\Sigma_{гн}$ – сумма главных ионов; Б.О. – бихроматная окисляемость. Обобщение выполнено по неопубликованным данным авторов и материалам [1, 3–5, 7]. Воды: C – гидрокарбонатные, Cl – хлоридные, Ca – кальциевые, Na – натриевые; прочерк – нет данных.

Значения индекса насыщения L амбарных и болотных вод

Формула	Амбары		Евтрофное болото
	Расчёт по средним измеренным значениям	Результаты моделирования	
$\text{CaCO}_3(\text{кальцит}) = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	0,26	-0,10	-8,79
$\text{CaCO}_3(\text{кальцит}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$	0,77	0,46	-0,78
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{доломит}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2 \text{CO}_3^{2-}$	0,66	-0,06	-17,13
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{доломит}) + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4 \text{HCO}_3^-$	1,67	1,05	-1,11
$\text{Ca}(\text{ГК}) = \text{Ca}^{2+} + \text{ГК}$	1,32	0,98	0,78
$\text{Mg}(\text{ГК}) = \text{Mg}^{2+} + \text{ГК}$	1,15	0,80	0,91
$\text{SiO}_2(\text{кварц}) + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	0,48	0,07	0,24
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{анортит}) + 3 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CO}_2 = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$	-256,16	-256,46	-258,17
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{анортит}) + 2 \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + \text{Ca}^{2+}$	-19,33	-19,94	-23,35
$2 \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2(\text{мусковит}) + 2 \text{H}^+ + 3 \text{H}_2\text{O} = 3 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + 2 \text{K}^+$	4,65	3,83	-3,61

Примечание. L – индекс насыщения; его отрицательное значение указывает на потенциальное недосыщение, а положительное – пересыщение раствора относительно вещества, взаимодействие с которым рассматривается.

Таблица 4

Измеренный и смоделированный химические составы амбарных вод

Показатель	Среднее арифметическое по измеренным значениям, мг/дм ³	Результаты моделирования, мг/дм ³	Отношение результатов измерений и моделирования, % от измерений
pH	8,0	5,1	64
$\Sigma_{\text{гн}}$	7211,8	2953,6	41
Ca^{2+}	248,4	94,9	38
Mg^{2+}	31,8	12,2	38
Na^+	2124,8	811,6	38
K^+	202,2	77,2	38
HCO_3^-	338,3	329,6	97
CO_3^{2-}	3,8	0,6	16
SO_4^{2-}	388,1	148,2	38
Cl^-	3 874,4	1 479,9	38
NO_3^-	4,96	1,895	38
NO_2^-	0,026	0,002	8
NH_4^+	1,6	0,611	38
PO_4^{3-}	0,68	0,0002	<1
Si	7,32	3,16	43
F^-	0,24	0,09	38
Al	0,022	0,02	91
Fe	19,277	3,696	19

Геохимические обстановки размещения и утилизации отходов бурения в болотных экосистемах Сибири определяются особенностями состояния торфяных болот – среды с пониженным содержанием веществ, необходимых для нормального функционирования лесных биогеоценозов таёжной зоны, повышенным содержанием органических веществ, соединений железа, ионов аммония и нитритов, низким значением pH и

избыточным увлажнением, что обуславливает развитие гидрофильной болотной растительности. Если не проводить никаких природоохранных мероприятий, то в течение нескольких лет произойдёт снижение суммарного содержания растворённых солей в амбарных водах примерно на 40%, а при условии водообмена амбаров с окружающей средой – и более. Соответственно, снижение суммы растворённых солей в амбарных во-

дах более чем на 40% может быть одним из критериев оценки эффективности гидроизоляции шламовых амбаров. Более перспективным представляется подход к утилизации отходов бурения путём их смешения с хозяйственно-бытовыми стоками и болотными водами, торфами, негашёной известью и использованию полу-

ченной смеси для рекультивации нарушенных участков болот. При этом, с одной стороны, произойдёт нивелирование концентраций веществ в различных средах, а с другой – улучшение свойств среды, благоприятствующих нормальному функционированию неболотных лесных экосистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Базанов В.А., Савичев О.Г., Волостнов Д.В. и др.* Влияние шламовых амбаров на геохимическое состояние болотных экосистем в бассейне реки Васюган // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307, № 2. С. 72–75.
2. *Бернатонис В.К., Архипов В.С., Здвижков М.А. и др.* Геохимия растений и торфов Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Под ред. М.В. Кабанова. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2002. С. 204–215.
3. *Савичев О.Г.* Водные ресурсы Томской области. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. 248 с.
4. *Савичев О.Г., Копылова Ю.Г., Хвацевская А.А.* Эколого-геохимическое состояние окружающей среды в Северном Приангарье (Восточная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316, № 1. С. 129–136.
5. *Savichev O.G., Kolesnichenko L.G., Saifulina E.V.* The ecologo-geochemical state of water bodies in the Taz-Yenisei interfluves // Geography and Nature Resources. 2011. Vol. 32, № 4. P. 333–336, DOI: 10.1134/S1875372811040056.
6. *Bleuten W., Lapshina E., Ivens W. et al.* Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of westsiberia // International Peat Journal. 1999. № 9. P. 73–82.
7. *Березин А.Е., Базанов В.А., Волостнов Д.В., Шинкаренко В.П.* Влияние шламовых амбаров на экологическую ситуацию вмещающих территорий // Охрана природы : сб. ст. / под ред. А.Е. Березина. Томск : Изд-во НТЛ, 2001. Вып. 2. С. 21–43.
8. *Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А.* Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. 2003. № 2. С. 108–119.
9. *Пологова Н.Н., Лапина Е.Д.* Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2002. С. 174–179.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 19 сентября 2013 г.