

Посвящается памяти чл.-кор. РАН Е. В. Пиннекера,  
выдающегося исследователя гидроминеральных ресурсов Сибири

УДК 553.04+553.777

## Литиевые подземные воды Иркутской области и Западной Якутии

С. В. АЛЕКСЕЕВ<sup>1</sup>, Л. П. АЛЕКСЕЕВА<sup>1</sup>, А. Г. ВАХРОМЕЕВ<sup>2</sup>, А. Г. ВЛАДИМИРОВ<sup>3,4,5</sup>, Н. И. ВОЛКОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры Сибирского отделения РАН,  
ул. Лермонтова, 128, Иркутск 664033 (Россия)

E-mail: salex@crust.irk.ru

<sup>2</sup>Иркутский филиал ООО "Роснефть-Бурение",  
ул. Лермонтова, 257, Иркутск 664033 (Россия)

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии Сибирского отделения РАН,  
проспект Академика Коптюга, 3, Новосибирск 630090 (Россия)

<sup>4</sup>Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск 630090 (Россия)

<sup>5</sup>Томский государственный университет,  
проспект Ленина, 36, Томск 634050 (Россия)

### Аннотация

Представлены новые данные о распространении и геохимических особенностях литиеносных подземных вод Иркутской области и Западной Якутии. Выполнено таксономическое расчленение гидрогеологического разреза Сибирской платформы, выделены перспективные рассолоносные зоны.

**Ключевые слова:** литиеносные соленые воды и рассолы, гидрогеологические формации и водоносные комплексы, геохимия подземных вод, Сибирская платформа, Восточная Сибирь

### ВВЕДЕНИЕ

Перспективность использования подземных соленых вод и рассолов Восточной Сибири в качестве гидроминерального сырья полезных ископаемых давно признана и не вызывает сомнения. Прогнозные геологические и эксплуатационные запасы гидроминерального сырья обоснованы в работах [1–11]. Сибирская платформа характеризуется уникальными ресурсами высокоминерализованных подземных вод (рис. 1). Ураганные концентрации многих ценных компонентов (Са, Mg, К, Cl, Br, Li, Sr и др.), многократно превышающие кондиционные требования для промышленного освоения подземных вод, определяют экономическую целесообразность комплексной переработки сибирских рассолов.

В настоящей статье систематизированы новые данные по геохимии подземных соленых вод и рассолов, выполнено таксономическое расчленение гидрогеологического разреза южной и северо-восточной части Сибирской платформы. На основании этого выделены конкретные перспективные площади и выполнена оценка запасов гидроминерального сырья, обеспечивающих в перспективе рентабельное производство литиевых продуктов в России.

### СИБИРСКАЯ ПЛАТФОРМА

Промышленные рассолы Сибирской платформы изучены в процессе нефтепоисковых работ, а также работ, связанных с поиском

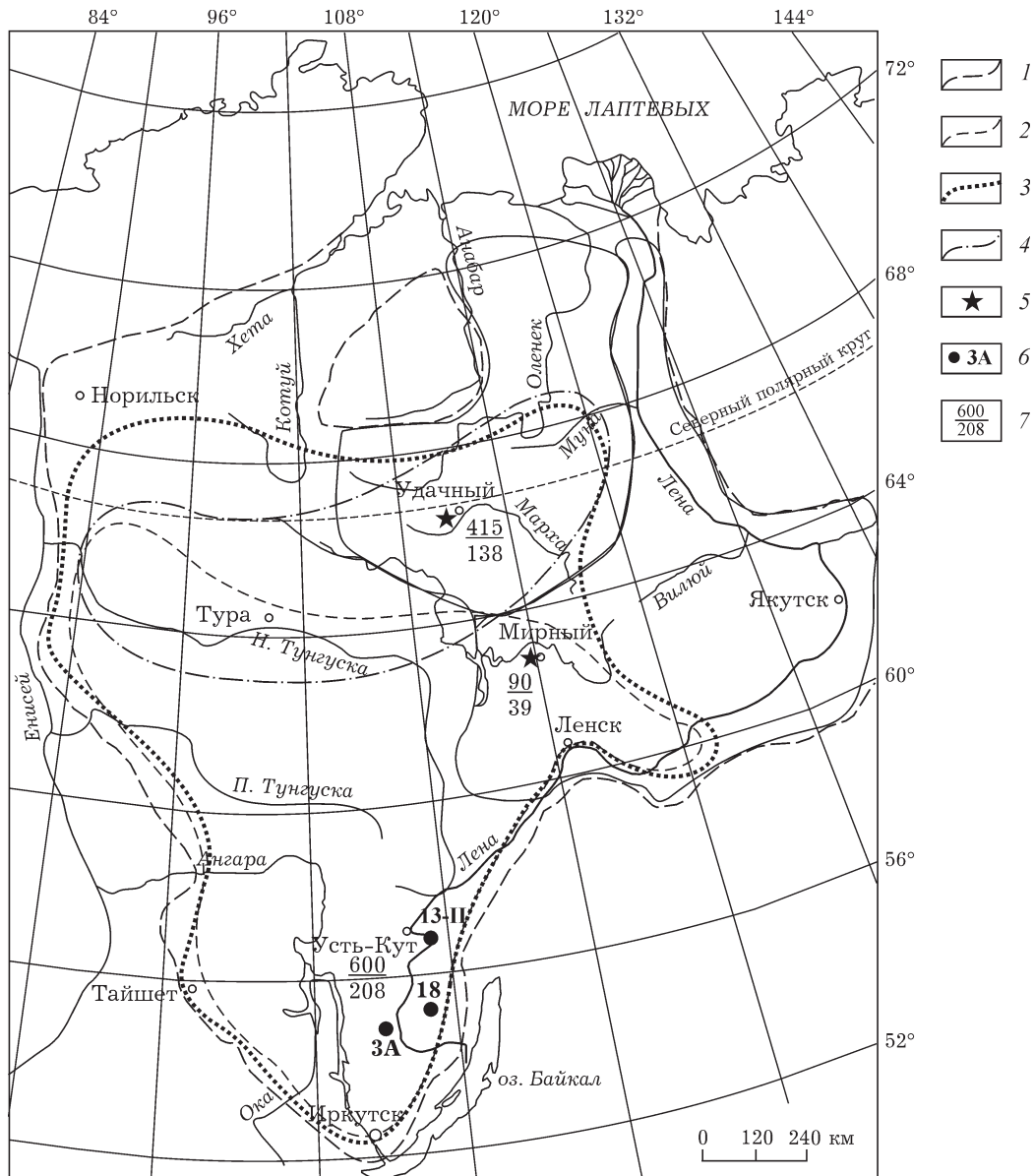


Рис. 1. Распространение соленосных отложений и литиеносных рассолов на Сибирской платформе: 1 – граница Сибирской платформы, 2 – граница распространения нижнекембрийских соленосных отложений, 3 – граница сплошного распространения литиеносных рассолов, 4 – зона полного насыщения осадочного чехла метаморфизованными литиеносными рассолами; 5 – алмазодобывающий карьер, 6 – нефтеразведочная скважина (Омолойская № 13-II, Ковыктинская № 18, Знаменская № 3А), 7 – данные по содержанию лития в подземных водах, мг/л (в числителе – максимальное значение, в знаменателе – среднее).

алмазов и других полезных ископаемых. К настоящему времени в пределах нефтегазоразведочных площадей пробурены сотни глубоких скважин. В Красноярском крае и Иркутской области выявлены высоконапорные зоны концентрированных рассолов с дебитом 3000–7000 м<sup>3</sup>/сут и давлением на устье скважин до 185 атм. На территории Якутии литиеносные

промышленно-значимые рассолы вскрыты при разработке кимберлитовых труб. В ряде карьеров их притоки составили 125–210 м<sup>3</sup>/ч, или 3000–5000 м<sup>3</sup>/сут.

Ниже приведена краткая гидрогеохимическая характеристика литиеносных подземных соленых вод и рассолов Иркутской области и Западной Якутии.

ТАБЛИЦА 1

Содержание основных компонентов в подземных водах в пределах Иркутской области и Западной Якутии

Формации	Mg/Li	Содержание,									
		г/л								мг/л	
		M*	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	Li <sup>+</sup>	Rb <sup>+</sup>	Sr <sup>2+</sup>
<b>Иркутская область</b>											
<i>Соленосная формация (E<sub>1</sub>)</i>											
Максимальное	70.3	631.1	26.2	119.4	42.2	166.5	405.66	12.6	600	25.5	8070
Минимальное	16.9	270	0.29	0.07	0.14	1.36	163.62	0.08	8.3	0.2	17
Среднее	63.5	454	12.3	36.2	13.2	96.2	268.8	5.2	208.4	10.1	2391
<i>Подсолевая формация (V-E<sub>1</sub>)</i>											
Максимальное	51.9	422.8	16.9	121.0	18.1	105.7	267.5	7.2	349	62	5480
Минимальное	164.7	195.2	1	8.1	2.8	10.4	121.7	0.05	17	1.2	22
Среднее	148.3	340.1	6.3	52.5	10.1	56.5	212.1	4.0	68.1	11.2	2437
<b>Западная Якутия</b>											
<i>Мало-Ботубинский район</i>											
<i>Соленосная формация (E<sub>1</sub>)</i>											
Максимальное	276.2	444.6	9.7	42.2	25.0	120.7	290.8	6.8	90.5	4.5	2549
Минимальное	1172.4	170	3.4	7.92	6.8	38.9	107.7	2.0	5.8	1.1	362
Среднее	437.3	404	8.1	13.4	17.1	101.7	257.2	5.9	39.1	3.6	1959
<i>Подсолевая формация (V-E<sub>1</sub>)</i>											
Максимальное	716.7	433.9	42.0	92.1	64.5	141.5	280.1	6.7	90	14.0	3400
Минимальное	2255.5	170	1.0	4.0	2.03	4.9	107.0	0.9	0.9	0.1	1300
Среднее	479.8	356.3	2.7	42.4	10.7	73.1	226.4	3.1	22.3	4.5	2200
<i>Далдыно-Алажитский район</i>											
<i>Водоносный комплекс (E<sub>3</sub>)</i>											
Максимальное	180.5	252.2	5	29.2	21.8	46.7	162.8	2.6	120.8	7.7	866
Минимальное	483.9	31.1	0.03	3.1	1.5	3.96	18.6	0.06	3.1	0.1	58
Среднее	225.2	92	1.7	8.3	7.5	13.8	58.6	1.0	33.3	1.21	311
<i>Водоносные комплексы (V-E<sub>2</sub>)</i>											
Максимальное	67.4	404.3	23.1	48.2	28.0	97.5	253.7	6.5	415.3	25.9	2138
Минимальное	52.8	198	2.4	8.4	1.8	34.1	99.1	1.8	34.1	1.6	223
Среднее	92.5	310.6	11.3	24.8	12.8	62.2	194.9	3.9	138.4	10.1	1032
<b>Дренажные воды карьера трубки Удачной</b>											
Максимальное	58.7	396.7	17.7	28.6	17.6	88.9	247.2	5.2	300	32.5	1578
Минимальное	244.6	96.8	4.2	7.6	3.4	6.1	57.7	0.6	13.9	1.9	154
Среднее	79.2	272.3	10.9	20.6	11.7	52.8	170.1	3.0	147.7	16.6	894

\*Минерализация подземных вод.

**Литиеносные рассолы платформенной части Иркутской области**

Приурочены к осадочным толщам поздне-докембрийского-кембрийского возрастов. Терригенно-карбонатные отложения чехла вмещают разнообразные по составу и минерализации подземные воды: от пресных до рас-

солов с различной крепостью, в том числе предельно насыщенных, с минерализацией более 600 г/л. Распространение рассолов обусловлено наличием в разрезе каменной соли. По отношению к пластам каменной соли в регионе выделяются подсолевая (терригенная), соленосная (галогенная) и надсолевая (карбонатная) гидрогеологические формации. С точки зрения

освоения подземных промышленных вод наиболее перспективны подсолевая и соленосная гидрогеологические формации (табл. 1).

**Подсолевая (терригенная) гидрогеологическая формация (V-Є<sub>1</sub>)** залегает на фундаменте Сибирской платформы и сложена отложениями ушачковской и мотской свит нижнего кембрия, а также рифея. Мощность формации изменяется от 500–1000 до 2000–2500 м. Водовмещающие породы представлены песчаниками, доломитами, доломито-ангидритами.

В формации отчетливо проявляется гидрогеохимическая инверсия, свойственная Ангаро-Ленскому артезианскому бассейну. Она выражается в том, что в подсолевых горизонтах минерализация рассолов меньше по сравнению с таковой для рассолов перекрывающей соленосной толщи [2] и варьирует в пределах 360–420 г/л. В верхней части верхнемотской подсвиты вскрыты предельно насыщенные рассолы с минерализацией 518 г/л (Кийская площадь). Состав рассолов в подсолевой гидрогеологической формации преимущественно хлоридный магниевый-кальциевый и реже – кальциевый-натриевый (см. табл. 1).

**Соленосная (галогенная) гидрогеологическая формация (Є<sub>1</sub>)** охватывает отложения уольской, бельской, булайской и ангарской свит раннего кембрия. На долю пластов каменной соли приходится более половины их суммарной мощности. Глубина залегания соленосной формации составляет 600–2500 м. Водовмещающие отложения имеют значительную мощность (1500–2000 м) и представлены трещиноватыми и кавернозными доломитами, известняками. Характерно развитие крепких, весьма крепких и предельно насыщенных рассолов. По химическому составу они относятся к хлоридным магниевый-кальциевым, реже кальциевым. Минерализация рассолов в основном составляет 270–500 г/л (см. табл. 1). Максимальные значения минерализации зафиксированы для Омолойской скв. № 13-II и Знаменской скв. № 3А (631 и 621 г/л соответственно).

#### *Литиеносные рассолы Мало-Ботубинского района Западной Якутии*

Охарактеризованы для подсолевой (терригенной) и соленосной гидрогеологических формаций.

**Подсолевая гидрогеологическая формация (V-Є<sub>1</sub>)** приурочена преимущественно к терригенным разностям пород, реже – к карбонатным, залегающим на глубине более 1.5 км. Водоносные горизонты представлены маломощными (10–50 м) пачками пород, ограниченными по вертикали и выдержанными по простиранию. Минерализация рассолов, залегающих в подсолевых осадочных толщах, составляет 170–434 г/л (см. табл. 1). По химическому составу рассолы хлоридные натриево-кальциевые.

**Соленосная гидрогеологическая формация (Є<sub>1</sub>)** сложена слабопроницаемыми карбонатными породами нижнего кембрия, образующими маломощные пласты-коллекторы. Коллекторы представлены трещиноватыми, кавернозными доломитами и ангидритами с низкими фильтрационными параметрами. Притоки рассолов получены с глубины 600–800 м. Состав подземных вод соленосной гидрогеологической формации преимущественно хлоридный магниевый-кальциевый (см. табл. 1). Минерализация рассолов изменяется от 170 до 445 л.

#### *Литиеносные рассолы Далдыно-Алакитского района Западной Якутии*

Характерной особенностью геологического строения района является отсутствие мощных выдержанных пластов каменной соли. Здесь осадочные толщи чехла Сибирской платформы представлены преимущественно терригенными, терригенно-карбонатными и карбонатными породами нижнего докембрия и палеозоя, которые прорваны многочисленными кимберлитовыми телами и трапповыми интрузиями. Литиеносные рассолы вскрыты в интервале глубин 0.1–2.5 км. Отсутствие водоупорных пластов каменной соли и интенсивная тектоническая раздробленность горных пород обуславливают существование в целом единой гидрогеодинамической системы с поэтажно залегающими водоносными комплексами.

**Верхнепротерозойский, нижнекембрийский и среднекембрийский водоносные комплексы (V-Є<sub>2</sub>)** приурочены к глинисто-карбонатным и карбонатным породам – известнякам и доломитам. Глубина вскрытия подземных вод изменяется от 500 до 2500 м. Тип коллекторов –

поровый, трещинно-поровый, трещинно-кавернозный, кавернозно-поровый. Подземные воды представлены крепкими и весьма крепкими растворами хлоридно-кальциевого состава. Их минерализация изменяется от 198 до 404 г/л.

**Верхнекембрийский водоносный комплекс (Е<sub>3</sub>)** вскрыт в карбонатных разностях отложенной моркокинской и мархинской свит. Среди плотных непроницаемых слоев мощностью 30–200 м выделяются пласты-коллекторы трещинно-порового типа, распределение которых в плане и разрезе крайне неравномерное. Глубина вскрытия подземных вод варьирует от 90 (в долинах рек) до 700 м (на водоразделах). В подошве комплекса залегают практически непроницаемые осадочные породы. Подземные воды верхнекембрийского комплекса представлены хлоридными магниево-кальциевыми, кальциево-магниевыми солеными водами и рассолами. Минерализация их изменяется в широких пределах – от 31 до 252 г/л при среднем значении 92 г/л (см. табл. 1).

**Литиеносные рассолы, связанные с алмазодносными кимберлитовыми трубками**, имеют тесную гидравлическую связь с водоносными комплексами вмещающих терригенно-осадочных толщ. Подземные воды, вскрытые в кимберлитовых телах и во вмещающих горных породах, характеризуются одинаковой величиной напоров, идентичны по составу и минерализации (см. табл. 1).

## ЛИТИЙ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

Содержание лития в пределах нижнекембрийской галогенной гидрогеологической формации Иркутской области весьма неоднородно. Крепкие рассолы с содержанием лития 30–560 мг/л вскрыты в северной и центральной частях области. В менее крепких рассолах, тяготеющих к окраинным частям Сибирской платформы, содержание лития составляет 1–125 мг/л. Слабые рассолы краевых участков содержат  $n \cdot 10^{-1}$ – $n \cdot 10$  мг/л лития. Неравномерность обогащения рассолов литием, по-видимому, связана с составом водовмещающих пород, степенью метаморфизации рассолов и интенсивностью сорбционных процессов. Его значительные проявления могут быть связаны с бишофитом и прослоями глин. В каменной соли содержание лития не превышает  $5 \cdot 10^{-4}$ % [1].

В целом среднее содержание лития галогенной формации составляет 208 мг/л. Его максимальная (600 мг/л) концентрация зафиксирована в балыхтинском водоносном горизонте на глубине 2076 м (скважина Ковыктинская № 18).

В Мало-Ботуобинском районе содержание лития в соленых и подсолевых крепких рассолах колеблется от 0.9 до 90.5 мг/л и заметно увеличивается с ростом минерализации подземных вод, что характерно для крепких рассолов во всех рассматриваемых районах. Рост содержания лития при увеличении минерализации и по мере уменьшения натрий-хлорного коэффициента подтверждает предположение о том, что один из путей накопления этого элемента – процесс метаморфизации подземных вод в обстановке гидрогеологической изоляции.

Содержание лития в соленых водах и рассолах верхнекембрийского водоносного комплекса Далдыно-Алакитского района изменяется от 3 до 120.8 мг/л (среднее – 33 мг/л). В рассолах глубокозалегающих (V-Е<sub>2</sub>) водоносных комплексов и обводненных зон кимберлитовых трубок и траптовых интрузий его среднее содержание выше и составляет 138 мг/л (при диапазоне 34–415 мг/л).

В дренажных водах карьера трубки Удачной среднее содержание лития достигает 148 мг/л (максимальное зафиксированное – 300 мг/л), хотя даже его минимальное содержание (14 мг/л) имеет промышленное значение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные гидрогеохимические данные свидетельствуют о высоком рудном потенциале подземных соленых вод и рассолов Сибирской платформы. Сравнительный анализ с промышленными месторождениями лития, которые представлены солеными озерами, позволяет сделать следующие выводы: подземные рассолы Иркутской области и Западной Якутии, хотя и уступают южноамериканским саларам по концентрации лития, вполне сопоставимы по этому параметру с месторождениями Цайдамской котловины Китая (соленые озера Ситай и Дунтай) и Силвер Пик в США (табл. 2).

К сожалению, рассматриваемые подземные воды характеризуются очень высоким

ТАБЛИЦА 2

Данные по концентрации лития и отношению Mg/Li в соленых озерах крупнейших месторождений мира [14, 15]

Страны	Месторождение	Содержание лития, мг/л		Mg/Li
		Диапазон	Среднее	
Аргентина	Ринкон	200–2400	330	8.6
	Омбрэ Муэрто	190–900	520–620	1.37
Боливия	Уюни	80–1150	320–532	18.6
Китай	Ситай	203–638	300	67.7
	Дунтай	161–591	300	40.3
	Цзабуе	896–1527	680–700	0.08
	Дансюнцо		430	0.22
Чили	Атакама	1000–7000	1400–1500	6.4
США	Силвер Пик	100–300	200	

отношением Mg/Li, что затрудняет извлечение лития, способствует удорожанию процесса производства и, вероятно, потребует разработки новых технологий. Экономическая целесообразность использования подземных вод в качестве гидроминерального сырья должна определяться для каждого месторождения на основе геолого-экономической оценки с учетом промышленной концентрации не только лития, но и других компонентов, а также всех геолого-гидрогеологических, экономических, технологических и технических факторов.

## ВЫВОДЫ

1. Иркутская область и Западная Якутия обладают богатейшими геологическими запасами литиеносных промышленных подземных вод, и по этому параметру сопоставимы с соляными озерами Южной Америки и Китая.

2. В долгосрочной перспективе использование комплексной инновационной схемы переработки гидроминерального сырья Сибирской платформы позволит обеспечить производство соединений лития с низкой себестоимостью и вывести из стагнации литиевую отрасль России. Для направления инвестиций в промышленное освоение “жидкой” руды необходима постановка запасов литиеносных рассолов Иркутской области и Западной Якутии на государственный баланс. В противном случае этот вид полезного ископаемого, как и прежде, в течение десятилетий будет ос-

таваться перспективным, но так и не востребованным литиевой промышленностью России.

3. В краткосрочной перспективе особое внимание следует уделить литиеносным рассолам кимберлитовой трубки Удачной в Западной Якутии, способной обеспечить резервные поставки сырья для литиевой отрасли России и проверить в промышленном масштабе новые способы переработки литийсодержащих рассолов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума СО РАН (ИП № 38 “Минеральные озера Центральной Азии – палеоклиматическая летопись высокого разрешения и возобновляемая жидкая руда”; ИП № 110 “Гидроминеральные ресурсы Сибири и сопредельных территорий: рудогенерирующий потенциал, новые технологии комплексной переработки, экологическая безопасность”, ИП № 6 “Минеральные озера Монголии – рудогенерирующий потенциал, инновационные технологии освоения, экология”, ИП № 5 “Минеральные источники Байкало-Монгольского региона: гидрогеохимическая паспортизация и перспективы практического использования (бальнеология, геотермальное энергоснабжение, извлечение полезных компонентов)” и РФФИ (проекты № 11-05-92221 “Физико-химические и гидрогеохимические условия накопления урана в соленых озерах Монголии”, № 12-05-92202 “Урановые озера Монголии: физико-химические и гидрогеохимические условия формирования”).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бойко Т. Ф. Металлоносность поверхностных вод и рассолов. М.: Наука, 1966. 120 с.
- 2 Пиннекер Е. В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука, 1966. 332 с.

- 3 Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. Э. А. Конторовича, В. С. Суркова, А. А. Трофимука. М.: Недра, 1981.
- 4 Вожов В. И., Герт А. А., Назарова М. Н., Паркаев Е. М. // Результаты работ по Межведомственной региональной научной программе "Поиск" за 1992–1993 гг. Ч. 2. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. С. 108–111.
- 5 Дзюба А. А., Пиннекер Е.В., Шварцев С.Л. // Там же. С. 101–104.
- 6 Владимиров А. Г., Пиннекер Е. В., Писарский Б. И., Алексеев С. В., Кусковский В. С., Владимиров В. Г., Волкова Н. И., Белозеров И. М. // Результаты работ по государственному заказу ОАО "ТВЭЛ", 1996. Т. 1, 2.
- 7 Vladimirov A. G., Kontorovich A. E., Shwartsev S. L., Pinneker E. V., Shmakin V. M., Yagol'nilser M. A., Beloserev I. M., Mukhin V. V. // Abstr. Vol. 30th Int. Geol. Congress. Beijing, China, 1996. Vol. 1. P. 367.
- 8 Анциферов А. С. // Разведка и охрана недр. 2004. № 8–9. С. 30–32.
- 9 Вахромеев А. Г. Закономерности формирования и концепция освоения промышленных рассолов (на примере юга Сибирской платформы): Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Иркутск, 2009. 36 с.
- 10 Алексеев С. В., Алексеева Л. П., Вахромеев А. Г. // Материалы Всерос. науч.-практ. совещ. с междунар. участ. "Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность". Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. С. 7–14.
- 11 Вахромеев А. Г., Головин А. П. // Материалы Всерос. науч.-практ. совещ. с междунар. участ. "Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность". Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. С. 100–101.
- 12 Баранов А. Н., Вахромеев А. Г., Коцупало Н. П., Рябцев А. Д., Янченко Н. И. Получение литиевых продуктов из сибирских рассолов для экологизации производства алюминия. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 125 с.
- 13 Карта промышленных вод Иркутской области масштаба 1 : 2 500 000. Иркутск: Изд-во ФГУ "Территориальный фонд информации по природным ресурсам и охране окружающей среды Иркутской области", 2005.
- 14 Jaskula B. W. Lithium [Advance Release] // USGS 2009 Mineral Yearbook. April, 2011. P. 44.1–44.10.
- 15 Moores S. // Ind. Minerals. 2007. Vol. 477. P. 58–69.