

УДК 553.04(553.777)

## Литиевые соляные озера Южной Америки и Центральной Азии

Н. И. ВОЛКОВА<sup>1</sup>, А. Г. ВЛАДИМИРОВ<sup>1,3,4</sup>, В. П. ИСУПОВ<sup>2</sup>, Е. Н. МОРОЗ<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт геологии и минералогии Сибирского отделения РАН, проспект Академика Коптюга, 3, Новосибирск 630090 (Россия)

E-mail: nvolkova@igm.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН, ул. Кутателадзе, 18, Новосибирск 630128 (Россия)<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск 630090 (Россия)<sup>4</sup>Томский государственный университет, проспект Ленина, 36, Томск 634050 (Россия)

### Аннотация

Проведен сравнительный обзор литиеносных гидроминеральных месторождений Южной Америки и Центральной Азии, связанных с соляными озерами. Основное внимание уделено таким параметрам, как концентрации лития в рассолах, отношение Mg/Li, определяющее эффективность извлечения лития, и оценке общих запасов. Сделан вывод о том, что главным источником лития служит литиевое гидроминеральное сырье, однако экономические условия добычи и переработки этого ценного компонента зависят от географических условий и удаленности от промышленных центров.

**Ключевые слова:** литий, рассолы, соляные озера, Южная Америка, Китай, Монголия, Россия, гидрогеология, химические технологии

### ВВЕДЕНИЕ

В конце XX века рапа соляных озер стала основным источником лития, резко отодвинув на второй план традиционный источник – литиевые пегматиты. Первоначально (1975–2000 гг.) вся добыча лития из рассолов была сосредоточена в Южной Америке (Чили и Аргентина), однако в последнее десятилетие большой скачок в этом направлении сделал Китай. Разработка литиевых пегматитов, тем не менее, продолжается в Западной Австралии, Канаде, Финляндии и Зимбабве, при этом потенциально новые месторождения открыты в Канаде и Португалии [1]. На сегодняшний день мировые ресурсы лития оцениваются в 35 млн т [2]. Примерно 60 % ресурсов находятся в рассолах соляных озер, около 26 % связаны с литиевыми пег-

матитами, а остальная часть литиевых ресурсов сосредоточена в осадочных породах, рассолах геотермальных и нефтяных полей. Наиболее крупные месторождения лития связаны с межзерновой рапой высохших содовых щелочных озер (саларов), расположенных на высокогорных плато Аргентины, Чили и Боливии (рис. 1). К ним относятся салары Атакама (Чили), Омбре Муэрто, Ринкон, Оларос (Аргентина), Уюни, Коипаса, Импекса (Боливия). Высокие промышленные концентрации лития установлены также в содовых щелочных озерах из районов молодого континентального вулканизма – Лагуна Пастос Грандос, Лагуна Качи, Лагуна Калина, Лагуна Лоромайя и др. (Боливия), оз. Бонневиль (США), озера Цзабуэй, Ситайцзинайэр, Дунтайцзинайэр, Дансюнцэ (Китай).

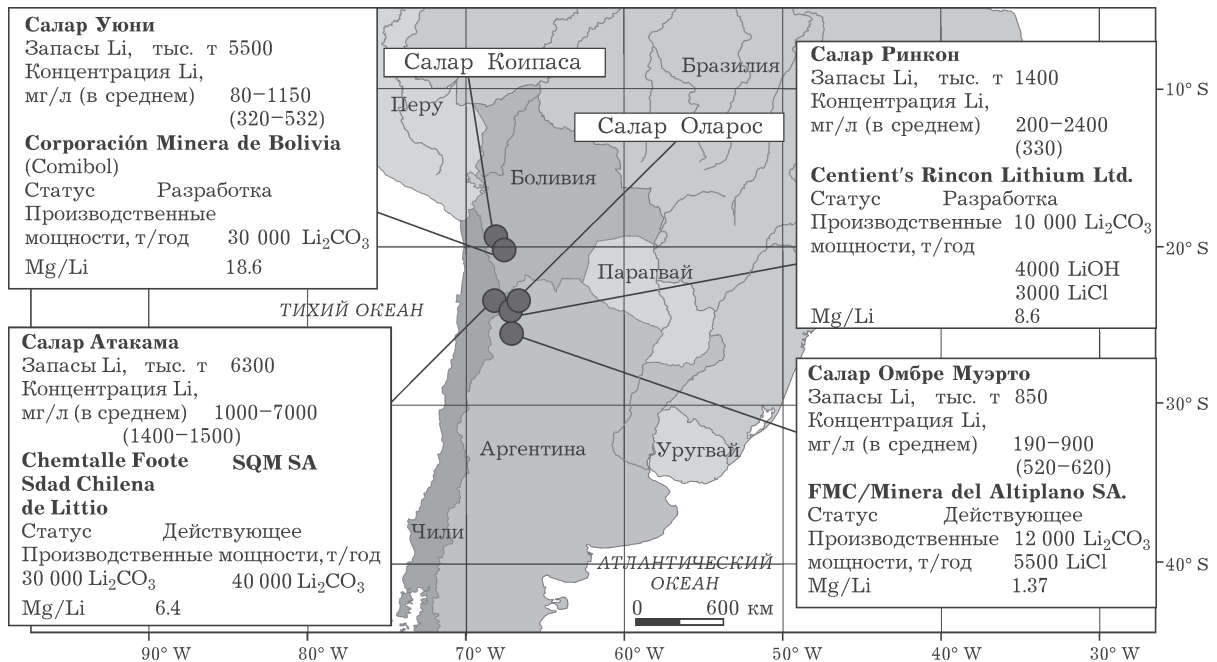


Рис. 1. Географическая позиция и экономико-геологические параметры литиевых соляных озер Южной Америки. Составлена по материалам [3, 8, 15] с изменениями авторов.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛИТИЯ

### Южная Америка

**Чили.** Самый крупный на сегодняшний день производитель лития в мире. В Чили существует высокоразвитое производство и транспортная инфраструктура, а также благоприятные климатические и географические условия для оптимального выпаривания на солнце соляных растворов. Главное литиевое гидроминеральное месторождение Чили – салар Атакама. Размеры этого солончака, расположенного на месте высохшего озера, составляют 90 × 55 км, площадь поверхности – 3000 км<sup>2</sup>, географическая высота – 2300 м. Мощность солей достигает 360–400 м и уменьшается до 40 м по периферии. Салар Атакама – самое сухое место на планете: количество осадков здесь составляет 10 мм/год, испарение – 3000 мм/год. Литиевые рассолы заполняют многочисленные поры в соляной корке галита мощностью 30–40 м. Содержание лития в рассолах варьирует в пределах 900–7000 мг/л [3, 4], и это максимальные значения для соляных озер. Оценочные запасы составляют 6.9 млн т лития [3]. Отношение Mg/Li в водах рассолов достигает 6.4. Начав-

шаяся в 1975 г. эксплуатация этого салара [3, 4] выявила проблемы, связанные с разработкой гидроминеральных месторождений. Прежде всего, это удаленность от развитых инфраструктур, в связи с чем геохимическую разведку пришлось вести с вертолета. В 2007–2009 гг. доля Чили в мировом объеме производства карбоната лития составляла 41–43%. Месторождение салар Атакама комплексное, так как характеризуется высокими концентрациями калия и бора, что обеспечивает экономическую эффективность и рентабельность извлечения лития.

**Аргентина.** Активная добыча лития началась с салара Омбре Муэрто (см. рис. 1). Это месторождение расположено в 240 км к юго-востоку от г. Антофагасты (Чили). Соляное озеро имеет площадь поверхности 565 км<sup>2</sup> и расположено на высоте 4300 м. Юго-восточный участок салара периодически испытывает подъем воды за счет стоков с лагуны Катал, при спаде воды остается белая гладкая соляная корка. Остальная часть поверхности салара покрыта неровной трещиноватой соляной коркой, под которой находятся литиеносные рассолы. Концентрация лития в них варьирует от 190 до 900 мг/л (среднее значение 520 мг/л), общие запасы оценива-

ются в 0.8–0.85 млн т лития [3, 5, 6]. Преимущество салара Омбре Муэрто заключается в геохимической специфике рассолов ( $Mg/Li = 1.37$ , низкие концентрации примесей), а также в близости к транспортным линиям, в частности железнодорожным, что позволяет переправлять коммерческий продукт в г. Антофагасту.

Салар Ринкон – главное гидроминеральное мультиэлементное месторождение Аргентины, расположенное на высоте 3740 м в пределах вулканической рифтовой долины Антофалла-Покитос на высокогорной Андийской равнине. Запасы месторождения оцениваются в 1450 млн т перерабатываемых рассолов, которые сосредоточены в пределах 250 км<sup>2</sup> закрытого бассейна на максимальной глубине 60 м. Среднее содержание лития в рассолах составляет 330 мг/л [3]. Согласно оценкам большинства экспертов, запасы лития здесь составляют 1.4 млн т [3, 6]. По сравнению с другими южноамериканскими саларами рассолы Ринкона характеризуются более низкими концентрациями лития и более высоким отношением  $Mg/Li$  (8.6). В этой связи литий планируется производить как сопутствующий продукт, а в качестве основных продуктов выступают  $KCl$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $NaCl$ . Производительность пилотного завода в 2008 г. составила 12 т  $Li_2CO_3$  [7].

**Боливия.** Эта страна занимает первое место в мире по запасам лития, но в настоящее время по экономическим и политическим причинам не осуществляет промышленное производство. Главное месторождение – салар Уюни, слагающий самую крупную в мире соляную равнину площадью 10 582 км<sup>2</sup>, расположенную на высоте 3650 м, с мощностью солей 121 м [5]. Содержание лития в рассолах варьирует от 80 до 1150 мг/л (среднее – 321 мг/л) [5], хотя имеются сообщения и о чрезвычайно высоких его концентрациях (4700 мг/л) [8]. По различным оценкам, запасы лития здесь составляют от 5.0–5.5 [3, 5] до 8.9–9.0 млн т [9, 10]. Следует отметить, что высокое отношение  $Mg/Li$  (18.6) затрудняет извлечение лития путем испарительного гелиоконцентрирования. Боливийское правительство не намерено отдавать это месторождение в эксплуатацию иностранным компаниям. Собственный пилотный проект по добыче и производству лития был запущен в мае 2008 г., и осенью

2009 г. небольшой завод около пос. Рио-Гранде выпустил первую продукцию карбоната лития.

### Центральная Азия

**Китай.** Доказанные литиевые резервы (в пересчете на чистый литий) достигли 3.35 млн т. Таким образом, эта страна сейчас занимает третье место в мире по запасам лития в рассолах соляных озер и четвертое – по запасам литиевых руд в целом [11]. Карбонат лития добывают из рассолов соляных озер Западного Тибета и Цайдамской котловины в провинции Цинхай (рис. 2).

Цайдамская котловина занимает северо-западную часть провинции Цинхай близ северо-восточной части Тибетского нагорья и расположена на высоте 2600–3100 м. Здесь находится 37 озер, 28 из которых соляные. Воды озер Цайдамской впадины характеризуются более высоким отношением  $Mg/Li$  (67.7 и 40.3 для озер Тайцзинайэр и Дунтайцзинайэр соответственно) и более низкими концентрациями лития по сравнению с озерами Цинхай-Тибетского нагорья [12]. В силу высокого отношения  $Mg/Li$  извлечение лития из озерных вод затруднено, однако сейчас создана новая технология для производства карбоната лития из высокомагнезиальных растворов [13]. Оценки запасов лития в соляных озерах Цайдамской котловины варьируют от 1.0 до 2.0 млн т [3, 5, 6]. Разработка ведется только на двух озерах: Тайцзинайэр и Дунтай (см. рис. 2). Озеро Тайцзинайэр (также называемое Ситай) имеет площадь в 82 км<sup>2</sup>. Производство карбоната лития составляет 5000 т/год, этот показатель планируется довести до 35 тыс. т [6]. Площадь оз. Дунтай (Дунтайцзинайэр) составляет 116 км<sup>2</sup>. Производство карбоната лития достигает 3000 т/год, запланированные объемы – 20 тыс. т [6]. Концентрации лития в водах озер Тайцзинайэр и Дунтай сопоставимы и составляют 203 и 161 мг/л соответственно, при этом межзерновая рапа обогащена литием (591–638 мг/л) [6].

Соляное оз. Цзабуе (Чабер) расположено в Тибетской автономной области на высоте 4420 м и является крупнейшим литиевым месторождением в Китае [14]. В 1987 г. здесь был открыт новый минерал – цзабуелит, с формулой  $Li_2CO_3$ . Площадь озера составляет

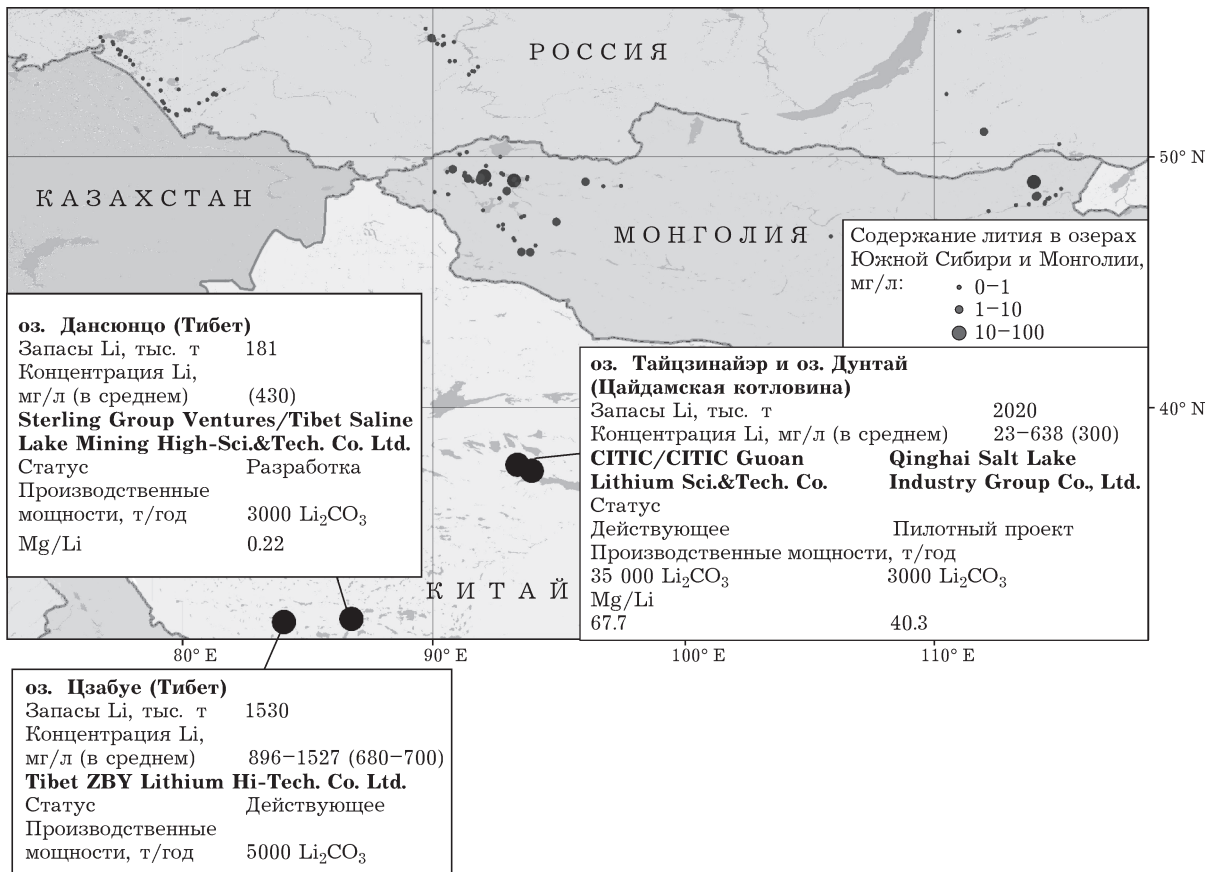


Рис. 2. Географическая позиция и экономико-геологические параметры литиевых соляных озер Центральной Азии. Составлена на основе материалов [3, 8, 15] с дополнениями авторов [16–20].

243 км<sup>2</sup>, средняя глубина 70 см, максимальная глубина 2 м. Содержание соли в озерной воде варьирует в пределах 360–410 г/л, лития – 896–1527 мг/л [14]. По концентрации лития в рапе (рассоле) салар Цзабуе занимает второе место в мире после салара Атакама в Чили, где содержание лития достигает 1600 мг/л. Резервные запасы лития составляют 1.53 млн т [3, 5, 6]. Добыча лития здесь началась в 1982 г. По данным Геологической службы США [15], производительность завода на оз. Цзабуе составляет 5000 т Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/год, в дальнейшем планируется нарастить мощности до 20 000 т.

Еще одно озеро на Тибетском нагорье, где ведется добыча лития, – оз. Дансюнцо. Площадь его равна 55 км<sup>2</sup>, глубина – 7.6 м, высота над уровнем моря – 4400 м. Концентрация лития в рассолах составляет 430 мг/л, Mg/Li = 0.22. Общие запасы лития оцениваются в 140 тыс. т [6], производство карбоната лития – 5000 т/год [6].

**Южная Сибирь и Монголия.** Оценка литиенности высокоминерализованных озер Южной Сибири и Монголии выполнена в ходе гидрогеохимических экспедиций 1995–1997, 2007–2010 гг. [16–20]. Содержание лития в изученных озерах Южной Сибири оказалось значительно ниже минимального уровня его концентраций в рассолах (10 мг/л), рекомендуемых для промышленного использования [21]. Наиболее высокие значения (2.6–2.9 мг/л), но все же не достигающие промышленного уровня, установлены для высокоминерализованных озер Хакасии (оз. Туз). Исследование микрокомпонентного состава соленых озер Монголии свидетельствуют о повышенном содержании в них лития, брома, урана, бора, а в ряде случаев – мышьяка. Выявлено, что содержание макро- (Na, Cl, SO<sub>4</sub>) и микрокомпонентов (Li, B, Br) коррелирует с минерализацией озерных вод, а содержание U-238 и As – с концентрацией гидрокарбонат-ионов [18, 19, 22]. Проведенные исследования позволяют

сделать вывод о потенциально высокой литиеносности минерализованных озер Северо-Восточной Монголии (Дорнодский аймак, до 48 мг/л Li в рассолах) и Северо-Западной Монголии (аймак Увс, до 98 мг/л в рассолах).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геологические условия формирования соляных озер Южной Америки и Китая, анализ которых приведен в обзорах [1–14, 23–25], а также данные по озерам Южной Сибири и Монголии [16–20, 22] позволяют сделать вывод о том, что содержание лития в водах конечных водоемов стока определяется литиеносностью питающих наземных и подземных вод, степенью минерализации рассолов, тектоно-вулканической активностью районов и климатическим режимом, который мог приводить к неоднократной садке легкорастворимых солей и, соответственно, к обогащению литием остаточной рапы. В качестве примера, подтверждающего эти выводы, можно привести классический геологический разрез, составленный через салиар Атакама (Чили) (рис. 3). Впа-

дины тектонического происхождения, которые занимает салиар Атакама, а также сопряженные с ним бессточные котловины служат естественными геоморфологическими и структурными ловушками, в которых идет аккумуляция легкоподвижных и легкорастворимых компонентов, включая литий.

Результаты экономико-геологического анализа свидетельствуют о том, что рассолы соляных озер стали доминирующим сырьем для производства карбоната лития во всем мире, однако их использование зависит от экономических условий добычи, транзита и поставки на химико-металлургические заводы. Лидерами по запасам лития в соляных озерах являются Боливия, Чили, Китай и Аргентина, а ведущими странами-производителями металлического лития и его химических соединений из литиеносных рассолов – Чили, Аргентина, Китай, США, Россия. Главная проблема разработки литиеносных озер связана с отсутствием инфраструктуры. Если южноамериканские салиары частично обеспечены инфраструктурой, то для Китая это представляет собой существенную проблему, поскольку для транспортировки готового про-

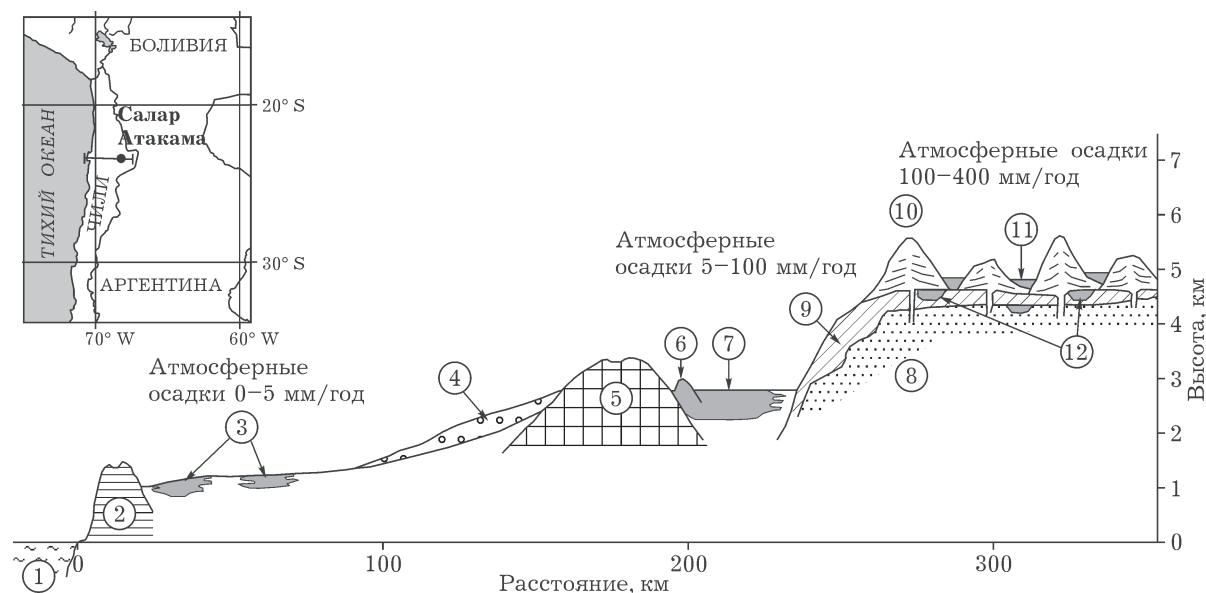


Рис. 3. Геологический разрез Тихий океан – салиар Атакама – Высокие Анды (составлен [23] с изменениями авторов): 1 – акватория Тихого океана; 2 – Береговой хребет, нерасчлененный; 3, 4 – пустыня Атакама (3 – салиары, 4 – конуса выноса предгорьев Кордильер); 5 – Предкордильеры (хребет Домейко); 6, 7 – Предандские депрессии (6 – Кордильера-де-ла-Саль, 7 – Салиар Атакама); 8–10 – Высокие Анды (8 – кристаллическое основание, 9 – илгнимбриды кислого состава, 10 – стратовулканы); 11 – современные салиары; 12 – предполагаемые захороненные салиары в Высоких Андах.

дукта необходимо строительство железных дорог и автобанов, что существенно повышает стоимость конечного продукта. Особый интерес представляет Монголия: здесь впервые обнаружены признаки литиеносности высокоминерализованных озер, что позволит обеспечить сырьем литиевую промышленность России.

Авторы благодарят чл.-кор. РАН Е. В. Склярова за поддержку проведенных исследований, а также выражают признательность В. С. Кусковскому, С. А. Тычкову, А. Г. Владимирову, О. П. Герасимову за участие в экспедициях и предоставление материалов по высокоминерализованным озерам Южной Сибири.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума Сибирского отделения РАН (интеграционные проекты № 29, 38, 110), СО РАН – Академия наук Монголии (совместный проект № 6 “Минеральные озера Монголии: рудогенерирующий потенциал, инновационные технологии освоения, экология”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Moores S. // *Ind. Minerals*. 2007. Vol. 477. P. 58–69.
- 2 Evans R. K. Lithium Production and Resources-Possible Short Term Oversupply. November 2010. URL: <http://seekingalpha.com/instablog/245042-r-keith-evans/110375-lithium-production-and-resources-possible-short-term-oversupply>.
- 3 Evans R. K. Lithium abundance – world lithium reserve. March 2008. URL: <http://lithiumabundance.blogspot.com/2008/03/>
- 4 Kunasz I. A. // *Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets and Uses*. 7th Ed. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Littleton, USA, 2006. 1548 p.
- 5 Garrett D. *Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride: Their Deposits, Processing, Uses and Properties*. Amsterdam: Elsevier Acad. Press, 2004.
- 6 Clarke G. M., Harben P.W. Lithium Availability Wall Map. June 2009. Referenced at International Lithium Alliance. URL: <http://www.lithiumalliance.org/about-lithium/lithium-sources/85-broad-based-lithium-reserves>.
- 7 Ecclestone C. Rincon Lithium. Hallgarten & Company. June 2008. URL: [http://www.hallgartenco.com/file.php?path=Mining&filename=Rincon\\_Lithium.pdf](http://www.hallgartenco.com/file.php?path=Mining&filename=Rincon_Lithium.pdf)
- 8 Tahil W. *The Trouble with Lithium 2. Under the Microscope*. Martainville, France: Meridian Int. Research, 2008. 54 p. URL: [http://www.meridian-int-res.com/Projects/Lithium\\_Microscope.pdf](http://www.meridian-int-res.com/Projects/Lithium_Microscope.pdf)
- 9 Risacher F., Fritz B. // *Chem. Geol.* 1991. Vol. 90. P. 211–231.
- 10 Evans R. K. An Abundance of Lithium: Part 2. July 2008. URL: [http://www.worldlithium.com/An\\_Abundance\\_of\\_Lithium\\_-\\_Part\\_2.html](http://www.worldlithium.com/An_Abundance_of_Lithium_-_Part_2.html)
- 11 Global & China Lithium Carbonate Industry Report, 2008-2010 (Updated Version) URL: <http://www.researchinchina.com/Report/Material/5430.html>
- 12 Zheng M, Liu X. // *Aquat. Geochem.* 2009. Vol. 15. P. 293–320.
- 13 Рябцев А. Д. // Тез. Всерос. науч.-практ. совещ. с междунар. участием “Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность”. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. С. 127–132.
- 14 Zheng M. *An Introduction to Saline Lakes on the Qinghai-Tibet Plateau*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1997. 294 p.
- 15 Jaskula B. W. // *Lithium [Advance Release]: USGS 2009 Minerals Yearbook*. April, 2011. P. 44.1–44.10.
- 16 Владимиров А. Г., Исупов В. П., Ариунбилэг С., Мороз Е. Н., Волкова Н. И., Кусковский В. С., Белозеров И. М. // Тез. Всерос. науч.-практ. совещ. с междунар. участ. “Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность”. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. С. 21–27.
- 17 Исупов В. П., Владимиров А. Г., Ляхов Н. З., Шварцев С. Л., Ариунбилэг С., Колпакова М. Н., Шацкая С. С., Чупахина Л. Э., Куйбида Л. В., Мороз Е. Н. // Докл. РАН. 2011. Т. 437, № 1. С. 85–89.
- 18 Исупов В. П., Ариунбилэг С., Владимиров А. Г., Шварцев С. Л., Волкова Н. И., Шацкая С. С., Колпакова М. Н., Мороз Е. Н., Куйбида Л. В. // Тез. Всерос. науч.-практ. совещ. с междунар. участ. “Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность”. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. С. 56–58.
- 19 Исупов В. П., Владимиров А. Г., Шварцев С. Л., Ляхов Н. З., Шацкая С. С., Чупахина Л. Э., Куйбида Л. В., Колпакова М. Н., Ариунбилэг С., Кривоногов С. К. // *Химия уст. разв.* 2011. Т. 19, № 2. С. 141–150.
- 20 Склярова О. А., Скляров Е. В., Меньшагин Ю. В., Данилова М. А. // Тез. Всерос. науч.-практ. совещ. с междунар. участ. “Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность”. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. С. 82–85.
- 21 Балашов Л. С., Голицын М. С., Ефремочкин Н. В., Бондаренко С. С. *Методические рекомендации по геохимической оценке и картированию подземных редкометаллических вод*. М.: ВСЕГИНГЕО, 1977. 87 с.
- 22 Шварцев С. Л., Исупов В. П., Владимиров А. Г., Колпакова М. Н., Мороз Е. Н., Ариунбилэг С. // Тез. Всерос. науч.-практ. совещ. с междунар. участ. “Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность”. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. С. 86–92.
- 23 Risacher F., Fritz B. // *Aquat. Geochem.* 2009. Vol. 15, No. 1–2. P. 123–157.
- 24 Волкова Н. И., Владимиров А. Г. // Тез. Всерос. науч.-практ. совещ. с междунар. участ. “Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность”. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. С. 28–33.
- 25 Романюк Т. В., Ткачев А. В. *Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых неоген-четвертичных бор-литиевых провинций*. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.