

*А. Н. Никитенков<sup>1,2\*</sup>, Д. А. Новиков<sup>1,3</sup>, И. И. Юрчик<sup>1,3</sup>*

## **Численное физико-химическое моделирование разработки объектов литийсодержащих рассолов**

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Институт геологии нефти и газа им. А.А.Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: sputnik70@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются подходы к моделированию извлечения лития из высокоминерализованных рассолов на примере месторождения X, расположенного в Иркутской области Восточной Сибири. Рассматривается процесс гидродинамической перекачки раствора в объеме коллектора с оценкой минеральных равновесий и возможных взаимодействий в системе вода-газ-горная порода. Исследование осуществляется методом математического физико-химического моделирования, реализованного средствами программного комплекса HydroGeo. Установлены предполагаемые формы миграции Li, оценены пути и интенсивность его перемещения в объеме пласта при модельных параметрах закачек, а также возможность выпадения вторичных минералов в осадок и мобилизации лития из содержащих его минералов. Рассмотренные подходы перспективны при моделировании разработки месторождений и попутного извлечения лития.

**Ключевые слова:** литий, моделирование, геомиграция

*A. N. Nikitenkov<sup>1,2\*</sup>, D. A. Novikov<sup>1,3</sup>, I. I. Yurchik<sup>1,3</sup>*

## **Numerical physical and chemical modeling of the development of lithium-containing brine objects**

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: sputnik70@yandex.ru

**Abstract.** The article discusses approaches to modeling the extraction of lithium from highly mineralized brines using the example of the X deposit located in the Itkutsk region of Eastern Siberia. The process of hydrodynamic pumping of a solution in the reservoir volume is considered with an assessment of mineral equilibria and possible interactions in the water-gas-rock system. The research is based on the method of mathematical physical and chemical modeling, implemented by the HydroGeo software package. The expected forms of Li migration have been established, the paths and intensity of its movement in the reservoir volume have been assessed under model injection parameters, as well as both the possibility of precipitation of secondary minerals and the mobilization of lithium from minerals containing it. The prospects for using similar approaches in modeling field development and associated lithium extraction are shown.

**Keywords:** lithium, modeling, geomigration

## ***Введение***

Проблема извлечения лития, впрочем, как и ряда других химических, в том числе и редкоземельных элементов из рассолов, получаемых преимущественно в ходе эксплуатации месторождений нефти и газа стоит в нашей стране давно и достаточно остро. С одной стороны, типичной является ситуация, когда вскрываются горизонты, содержащие экономически рентабельные для извлечения концентрации сопутствующих химических элементов. С другой стороны – зачастую имеем ситуацию, при которой рентабельность их извлечения много ниже рентабельности основного производства и, в связи с этим, эксплуатант недр оказывается не заинтересован в «попутном» извлечении ряда других ресурсов. Проблеме извлечения лития из воды посвящен ряд как отечественных, так и зарубежных публикаций, в которых довольно детально рассмотрены вопросы, связанные с содержанием и нахождением лития в глубинных рассолах [1, 14, 10, 12], технологиями его извлечения из них [5, 3, 13, 2, 17, 19], применения лития и комплексного использования месторождений [6, 4, 11]. Последние данные по гидрогеохимии нефтегазоносных отложений Сибирской платформы достаточно подробно рассмотрены в работах [7-9, 15, 16].

В данной работе на примере фактических данных по одному из газоконденсатных месторождений X сделана попытка описания процессов, связанных с извлечением литий-содержащих рассолов из пласта на основе математического аппарата, решающего задачи гидродинамики и термодинамики. В частности, рассматривается процесс гидродинамической перекачки раствора в объеме коллектора с оценкой минеральных равновесий и возможных взаимодействий в системе вода-газ-горная порода. Целью работы является характеристика данных процессов, в рамках для достижения которой решаются задачи построения гидродинамической модели, геохимической модели коллектора и раствора, а также изучения процессов в системе вора-порода при взаимодействиях внутри неё, с оценкой минеральных равновесий в системе. Результаты предполагается использовать для анализа возможности и рентабельности извлечения лития на реальных месторождениях.

## ***Методы и материалы***

Исходными данными для выполнения данной работы послужили материалы по одному из ГКМ месторождений X (Иркутская область), полученные в рамках камеральных сейсморазведочных работ, а также фондовые материалы по месторождению. Реализация моделирования велась средствами программного комплекса HydroGeo [18].

При создании геохимической модели были учтены данные анализа химического состава рассолов месторождения (табл. 1), они же послужили основой для термодинамического моделирования взаимодействий в системе вода-порода, оценки минеральных равновесий.

При моделировании в систему был включен следующий набор базовых ионов для рассмотрения поведения основных микрокомпонентов:  $H^+$ ,  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,

Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mn<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, (UO<sub>2</sub>)<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, e<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, (SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup>, (H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, (HCO<sub>2</sub>)<sup>-</sup>, (HCO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, (NO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, LiHCO<sub>3</sub>, (LiCO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, LiNO<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, (LiSO<sub>4</sub>)<sup>-</sup>, (LiS<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, (Li(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)<sup>3-</sup>, (Li(HS<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)<sup>-</sup>, LiHS<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, LiHSO<sub>4</sub>, LiCl, LiOH, (B(OH)<sub>4</sub>)<sup>-</sup>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, (HBO<sub>3</sub>)<sup>2-</sup>, (BO<sub>3</sub>)<sup>3-</sup>, (B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>)<sup>2-</sup>, (BO<sub>2</sub>)<sup>-</sup>, (B(OH)<sub>6</sub>)<sup>3-</sup>, (B(OH)<sub>5</sub>)<sup>2-</sup>, (B<sub>4</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>)<sup>2-</sup>, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sup>+</sup>, NaB(OH)<sub>4</sub>, NaBr, MgBr<sub>2</sub>, KBr, CaBr<sub>2</sub>, BrCl<sup>-</sup>, (Br<sub>5</sub>)<sup>-</sup>, (Br<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, HBr, (BrO<sub>4</sub>)<sup>-</sup>, (BrO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, BrO<sup>-</sup>, HBrO<sub>3</sub>, HBrO.

Таблица 1.

Химический состав вод вод месторождения, г/л (для компонентов)

№ сква- жины	Общ. мин.	pH	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Fe <sub>общ</sub>	Mn	Al	Br	B	Li	Sr
А	290,1	4,6	60,7	3	42,1	3,04	177,97	0,69	0,05	0,034	0,092	0,0016	2,53	0,0082	0,03	0,671
Б	268,9	4,4	41,1	2,41	50,1	4,86	166,8	0,17	0,043	0,052	0,144	0,00026	3,4	0,00013	0,095	1,52
В	290	4,6	60,7	3	42,08	3,04	177,97	0,693	0,048	0,034	0,092	0,0016	2,5	0,0082	0,03	0,671
Г	279,6	2,9	37,2	3,3	56,1	5,47	173,97	0,203	0	0,175	0,155	0	3,333	0	0,051	0
Д	298,9	4,9	54,6	2,63	50,1	3,64	184,1	0,204	0,024	0	0,206	0	3,6	0	0,054	1,814
Е	361,8	5,3	8,7	12,1	54,1	42	240,57	0,19	0	0,001	0,02	0	4,1	0	0,078	0,909
Ё	508,5	7,1	0,18	15,6	142,8	19,8	326,44	0,1	0,15	0	0,016	0	3,4	0	0,238	4,84
Ж	487,6	5,5	1,24	20	124,3	23,1	305,26	0,02	0	0	0,048	0	4,66	0	0,214	5
З	333,3	6,2	32,5	6,1	30,5	38,9	220,92	0,33	0,73	0	0,038	0	3,33	0,037	0,319	0,958

Также в систему было включено 58 минералов исходя из данных о типичных для подобных формаций первичных и вторичных минералах. Расчёты минеральных равновесий, а также форм миграции основных микрокомпонентов реализованы непосредственно в программном комплексе HydroGeo.

В качестве основы для построения упрощенной гидрогеологической модели фрагмента продуктивного пласта месторождения (фрагмент составляет несколько % от общей площади) использовались исходные данные по геологическому строению, на основе которых создана конечно-разностная сетка в программном комплексе HydroGeo, а также данные по отдельным скважинам месторождения, полученные из фондовых материалов. Так, при непосредственном пространственном описании модели была создана сетка размерами 18x14 блоков, состоящая из 5 слоёв мощностью 5 метров каждый. Сетка охватывает фрагмент центральной части месторождения и призвана продемонстрировать основные закономерности перераспределения вещества в объёме пласта при нагнетании раствора, соответствующего по составу исходному раствору пласта за исключением извлеченного из него лития и при его откачке через другую, находящуюся относительно недалеко скважину. Пространственное разрешение по горизонтальным осям составляет 25 метров. Граничные условия заданы в виде границы первого рода (блоков с постоянным напором), что предполагается из геологического разреза. Также исходим из допущения, что продуктивный пласт насыщен раствором, соответствующим пробе из скважины А. Величина открытой пористости была принята равной 15%, проточная пористость оценена в 10%. Величины исходных напоров очень сильно зависят от режима работающих сква-

жин, при моделировании для всего пласта в качестве начального значения была принята величина в 22,66 МПа. Коэффициент фильтрации, используемый при расчётах, был принят (по экспертным оценкам) равным 0,5м/сут. Величина коэффициента пьезопроводности для всего пласта была принята, по литературным данным, равной  $5 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/сут.

Расходы как откачной, так и закачной скважин приняты равными 500 м<sup>3</sup>/сутки, расположение представлено в табл. 2.

Таблица 2

Расположение скважин на сетке модели по осям координат:

		Откачная	Нагнетательная
Координаты	X	16	4
	Y	3	11
	Z	2	1

Моделирование гидродинамики проводилось на срок до 3 лет с контролем изменения концентраций лития в блоках модели. Критерием остановки служило достижение зоной падения концентраций лития откачной скважины. Шаг моделирования гидродинамики выбран равным 0,1 суткам.

### Результаты

В результате оценки минеральных равновесий растворов месторождения с первичными и вторичными минералами получена достаточно разнообразная картина, отраженная в табл. 3. Помимо оценки параметров насыщенности была произведена оценка форм миграции основных микрокомпонентов, которыми богаты рассматриваемые рассолы (табл. 4). Результат моделирования процесса откачки литий-содержащего раствора, при условии работы двух скважин: нагнетательной и откачивающей, на срок 3 года представлен на рис. 1.

Таблица 3.

Параметр насыщенности (L) раствора к минералам

Минерал	Формула	Параметр насыщенности (L), в заголовке – номер скважины									
		А	Б	Б	Г	Д	Е	Ё	Ж	З	
анортит	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	-20	-29	-20	-59	-20	-13	24	4,6	-5	
полевошпат (К)	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	-2,1	-6,9	-2,1	-21	-2,4	0,14	19	11	6,3	
альбит	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	-7	-12	-7	-27	-7,2	-6,9	7,9	4,8	-3,8	
пироксен(Са-Аl)	CaAl <sub>2</sub> SiO <sub>6</sub>	-30	-40	-30	-69	-30	-23	14	-5,9	-15	
пренит	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	-24	-34	-24	-71	-23	-16	31	7,1	-4,4	
кордиерит	Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>	-54	-72	-54	-130	-54	-35	38	1,5	-20	
гибсит	Al(OH) <sub>3</sub>	5	1	5	-10	4,1	6,3	20	13	9,2	
монтмориллонит	Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> м	3,3	-4,7	3,3	-27	1,7	5	33	20	12	
каолинит	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> к	6,4	-1,6	6,4	-24	4,7	8,4	36	23	15	
Монтмориллонит (Mg)	MgAl <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> (OH) <sub>2</sub>	-7,2	-16	-7,2	-46	-7,3	0,52	37	20	9,2	
алузит	KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	17	3,2	17	-63	9,8	19	46	33	20	

Минерал	Формула	Параметр насыщенности (L), в заголовке – номер скважины								
		А	Б	Б	Г	Д	Е	Ё	Ж	З
мусковит	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	9,9	-2,8	9,9	-40	7,9	16	63	40	28
флогопит	$KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ ф	-33	-40	-33	-75	-29	-13	31	11	-2,8
сидерит	$(Fe^{2+})CO_3$	10	8,9	10	-2,1	3	-1,2	-0,13	3,3	-8,8
родохрозит	$(Mn^{2+})CO_3$	42	41	42	29	42	32	35	40	28
хлорит(Al)	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$	30	14	30	-1000	26	34	89	63	47
Монтмориллонит (Ca)	$Ca_{1.15}Al_{1.9}Si_4O_{10}(OH)_2$	4	-3,8	4	-26	2,6	5,8	34	21	13
Монтмориллонит (Fe <sup>2+</sup> -Mg)	$(Fe^{2+})_{.2924}Mg_{.29}Al_{1.6984}Si_{3.935}O_{10}(OH)_2$	-6,4	-14	-6,4	-37	-8,8	-4,3	23	11	1,8
монтмориллонит(К)	$K_{.3}Al_{1.9}Si_4O_{10}(OH)_2$	-2,5	-10	-2,5	-33	-3,9	-0,62	27	15	7,1
мусковит(Fe <sup>2+</sup> )	$K(Fe^{2+})AlSi_4O_{10}(OH)_2$ м	4,8	-0,51	4,8	-21	-0,28	3,8	27	18	8
гематит	$(Fe^{3+})_2O_3$	8,2	6,2	8,2	-13	0,098	7,3	24	17	3,2
гётит	$(Fe^{3+})OOH$	8	7	8	-2,4	4	7,2	16	12	5,3
пирит	$(Fe^{2+})S_2$	48	52	48	66	28	22	-53	-17	-1
иллит(К)	$K_{.5}Al_{2.5}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$	9,3	-1,1	9,3	-31	7,4	13	50	33	23
монтморилло-нит(Na)	$Na_{.3}Al_{1.9}Si_4O_{10}(OH)_2$	7	-0,92	7	-24	5,6	8,2	35	24	15
иллит(К <sub>.67</sub> )	$K_{.67}Al_{2.67}Si_{3.33}O_{10}(OH)_2$	11	-0,13	11	-33	9,2	16	56	37	26
иллит(К-Mg)	$K_{.6}Mg_{.25}Al_{2.3}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$	5,8	-4,1	5,8	-34	4,6	11	48	31	20
мусковит(Mg)	$KMgAlSi_4O_{10}(OH)_2$ м	-15	-21	-15	-42	-14	-8,6	19	7,6	-0,11
биотит(К-Fe <sup>2+</sup> )	$K(Fe^{2+})_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ б	32	26	32	-6,7	18	28	60	46	26
иллит(К-Fe <sup>3+</sup> )	$K_{.5}(Fe^{3+})Al_{1.5}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$	22	15	22	-13	17	23	55	41	28
мусковит(Fe <sup>3+</sup> )	$K(Fe^{3+})_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$	15	8,5	15	-25	6,8	16	52	36	18
биотит(К-Fe <sup>3+</sup> )	$K(Fe^{3+})_3Al_4O_{10}(OH)_2$	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	72	160	110	78
бейделлит(К)	$K_{.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2$	7,2	-2,3	7,2	-30	5,5	10	45	29	19
иллит(К <sub>.8</sub> )	$K_{.8}Al_{2.56}Si_{3.38}O_{10}(OH)_2$	9,6	-1,2	9,6	-33	7,9	14	54	35	24
бейделлит(Na)	$Na_{.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2$	5,3	-4,4	5,3	-32	3,5	7,8	41	26	15
монтморилло-нит(Na-Ca)	$Na_{.27}Ca_{.1}K_{.02}(Fe^{3+})_{.19}Mg_{.22}Al_{1.58}Si_{3.94}O_{10}(OH)_2$	-1	-8,1	-1	-31	-2,5	1	28	17	7,3
биотит(Na-Fe <sup>2+</sup> )	$Na(Fe^{2+})_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$	23	17	23	-16	9	17	45	37	12
парагонит(метам.)	$NaAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ п	3	-10	3	-48	1,1	7,3	50	32	15
хлорит(Mg)	$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$ х	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-24	46	13	-9,7
иллит(Mg)	$Mg_{2.75}Al_{1.5}Si_3O_{10}(OH)_2$	-34	-42	-34	-78	-31	-16	28	7,2	-6,9
хлорит(Mg)	$Mg_{2.25}Al_{1.5}Si_{1.25}O_5(OH)_4$	4,2	-3,7	4,2	-36	6,4	19	59	40	27
хлорит(Mg)	$Mg_{4.5}Al_3Si_{2.5}O_{10}(OH)_8$	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	120	80	55
монтморилло-нит(Mg-Fe <sup>3+</sup> )	$Mg_{.67}(Fe^{3+})_{.14}Al_{1.84}Si_{3.68}O_{10}(OH)_2$	-2,5	-11	-2,5	-37	-3,6	2,9	36	21	10
монтмориллонит	$Ca_{1.187}Na_{.0205}K_{.0205}Fe^{3+}_{.141}Mg_{.336}Al_{1.59}Si_{3.93}O_{10}(OH)_2$	-2,6	-9,7	-2,6	-33	-3,7	0,55	29	16	7,5
монтморилло-нит(Fe <sup>3+</sup> -Mg)	$(Fe^{3+})_{.335}Mg_{.4456}Al_{1.6084}Si_{3.82}O_{10}(OH)_2$	0,55	-6,6	0,55	-31	-1,5	3,9	33	20	10
глинистый минер.	$(Fe^{3+})_2Si_4O_{10}(OH)_2$	16	14	16	-4,8	7,9	12	29	24	10
ангидрит	$CaSO_4$	0,81	-0,93	0,81	-22	-0,33	1,2	1,3	0,94	-0,88
гипс	$CaSO_4(H_2O)_2$	1,8	0,15	1,8	-21	0,65	1,6	1,4	1,4	-0,67
галит	$NaCl$	-0,95	-1,4	-0,95	-1,4	-0,91	-1,2	-4,1	-0,36	-2,4
гидрогалит	$NaCl(H_2O)_2$	-1,5	-1,9	-1,5	-1,9	-1,5	-2,4	-5,5	-1,4	-3,7
сильвин	$KCl$	-1,5	-1,7	-1,5	-1,3	-1,5	0,43	1,6	0,37	2,4
сподумен	$LiAlSi_2O_6$	-31	-34	-31	-67	-30	-27	-8	-16	-21
бикитаит(цеолит)	$Li_2Al_2Si_4O_{12}(H_2O)_2$	-8,8	-16	-8,8	-81	-7,8	-3,5	35	19	8,9

## Состав раствора, молярные % от суммы 1-го иона

Компонент	Скважина								
	А	Б	Б	Г	Д	Е	Ё	Ж	З
Li <sup>+</sup>	84,18	91,43	84,60	97,88	88,38	55,55	30,52	40,97	69,11
(H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>	0,02	0,02	0,02	0,00	0,05	0,02	0,96	0,54	0,19
Br <sup>-</sup>	15,55	15,06	15,64	13,48	11,67	7,45	2,94	3,16	1,12
LiHCO <sub>3</sub>	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	13,03	6,53	12,59	0,00	8,95	0,03	14,34	52,06	0,01
Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,31	0,20	0,32	0,00	0,19	0,98	0,77	2,31	0,43
(LiSO <sub>4</sub> ) <sup>-</sup>	0,60	0,14	0,61	0,00	0,20	0,69	0,23	0,55	0,07
LiCl	1,86	1,69	1,87	2,12	2,27	42,75	54,15	4,11	30,38
(B(OH) <sub>4</sub> ) <sup>-</sup>	0,01	0,01	0,01	0,00	0,03	0,04	1,21	0,24	0,08
NaBr	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,08	0,05	0,01	0,02
MgBr <sub>2</sub>	0,88	1,04	0,87	0,98	1,19	0,95	1,10	0,89	1,32
KBr	0,34	0,44	0,34	0,42	0,39	0,11	0,09	0,26	0,20
CaBr <sub>2</sub>	1,13	1,25	1,12	1,10	1,42	0,51	0,32	0,74	0,51

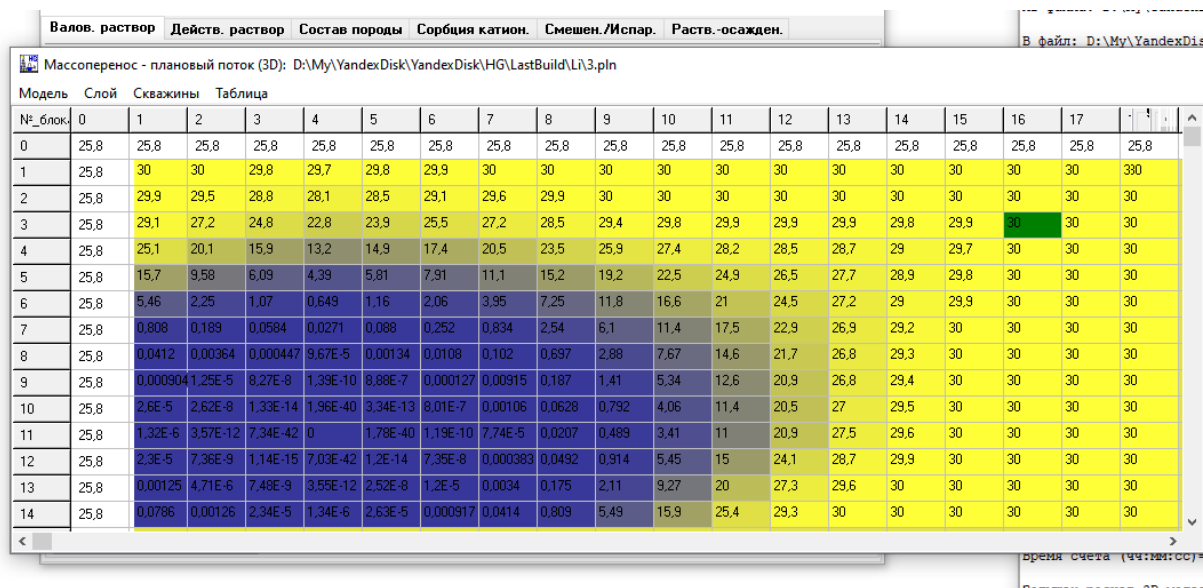


Рисунок 1. Фрагмент окна программы с полем концентраций Li в расчётных блоках 1-го слоя модели на срок 3 года (оттенки синего – снижение содержание лития, X4:Y11 – нагнетательная скважина; X16:Y3 – откачная скважина).

### Обсуждение

Следует отметить, что в таблице 3 приведены только минералы, по отношению к которым теоретически возможно достижение состояния насыщения. Для того, чтобы программа могла оценить возможность такого процесса, нулевые значения концентрация ряда химических элементов были заменены на величину порядка 0,1 мг/л.

На практике же, возвращаясь к таблице с содержанием элементов по скважинам, можно отметить, что железо, алюминий, гидрокарбонат-ион, бор и стронций обнаружены не во всех пробах, при этом ионы алюминия обнаружены только в пер-

вых трех пробах, содержание гидрокарбонат-иона не превышает 730 мг/л, а сульфат-иона – 690 мг/л. Таким образом речи о больших изменениях в составе вод с большими объемами вторичного минералообразования идти не может.

Устойчиво в значимых количествах в отдельных скважинах могут образовываться карбонаты, оксиды и гидроксиды, а также сульфаты, объемы выпадения в осадок которых контролируются степенью насыщения и концентрацией соответствующих минералообразующих компонентов.

Из форм миграции лития для большинства скважин преобладает собственный ион лития, лишь в скважинах Ё и Ж уступая преобладающим в них LiCl и Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> соответственно. Для брома основными формами миграции являются его комплексные соединения MgBr<sub>2</sub> и CaBr<sub>2</sub>. Бор в большинстве случаев мигрирует в форме H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>. В целом, преобладающие формы миграции определяются конкретными геохимическими условиями среды и балансом основных ионов.

По результатам гидродинамического моделирования показано, что на протяжении расстояния порядка 500 метров между скважинами при заданных фильтрационно-емкостных параметрах потребовалось около 3 лет. При масштабировании рассмотренной модели возможно относительно полноценное описание объёмов и скоростей извлечения лития из продуктивного горизонта, а также прогноз и оптимизация параметров эксплуатации месторождения.

### *Заключение*

В результате проведенной работы оценены минеральные равновесия вод рассматриваемого месторождения с минералами, проведена оценка форм миграции (для выявления закономерностей по которым предполагается получение больших объемов исходных данных), а также оценено перемещение фронта состава вод по продуктивному пласту. Таким образом можно говорить о разработке подходов к пониманию формирования состава вод месторождения, и особенностей их перемещения по продуктивному пласту, что должно стать основой для построения моделей более высокого уровня, на основе которых возможна поддержка процессов управления извлечением гидроминерального сырья в пределах рассматриваемого и аналогичных месторождений.

### *Благодарности*

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Вахромеев А. Г. Закономерности формирования и концентрация освоения промышленных рассолов (на примере юга Сибирской платформы): дис. ... доктора геолого-минералогических наук. Российская академия наук. Сибирское отделение. Институт земной коры. – Иркутск, 2009. – С. 250–261.
2. Комелин И. М. Извлечение лития из петалитовой руды хлоридовозгонным обжигом // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 15–26.
3. Коцупало Н. П. Физико-химические основы получения селективных сорбентов и создание технологий извлечения лития из рассолов с их использованием: дис. ... доктора техниче-

ских наук. Всероссийская академия наук. Сибирское отделение. Институт химии твердого тела и механохимии. ЗАО «Экостар-Наутех». – Новосибирск, 2000. – С. 13–14.

4. Кудрявцев П. Г. Литий: мировые запасы и перспективы применения // Альтернативная энергетика и экология. – 2016. – №. 13-14. – С. 72–88. DOI: 10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088.

5. Литвиненко В. И. Эколого-технологические основы комплексной переработки пластовых вод нефтяных месторождений (на примере Тимано-Печерской нефтегазоносной провинции): дис. ... доктора технических наук. Научно-исследовательский и проектный институт Печорнипинефть. – М., 2000. – С. 42, 232, 242.

6. Литвиненко В. И., Цхадая Н. Д., Волков В. Н. Эколого-технологические основы комплексного использования пластовых вод нефтяных месторождений // Учебное пособие. Министерство образования Российской Федерации. Ухтинский государственный технический университет. – Ухта: УГТУ, 2001. – 59 с.

7. Новиков Д. А., Гордеева А. О., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф., Житова Л. М. Влияние траппового магматизма на геохимию рассолов нефтегазоносных отложений западных районов Курейской синеклизы (Сибирская платформа) // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 6. – С. 861–881.

8. Новиков Д. А., Пыряев А. Н., Черных А. В., Дульцев Ф. Ф., Ильин А. В., Чертовских Е.О. Новые данные по изотопному составу ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C$ ,  $^{87}Rb/^{86}Sr$  и  $^{87}Sr/^{86}Sr$ ) рассолов Сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 20-33.

9. Новиков Д. А., Черных А. В., Константинова Л. Н., Дульцев Ф. Ф., Юрчик И. И. Гидрогеохимия венда Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 8. – С. 1081–1101.

10. Остроушко Ю. И., Дегтярева Т. В. Гидроминеральное сырье - неисчерпаемый источник лития: Аналитический обзор. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1999. – 64 с.

11. Рамазанов А. Ш., Каспарова М. А., Сараева И. В., Алхасов А. Б., Рамазанов О. М. Комплексная переработка минерализованных геотермальных вод // Экология и пром-ть России. – 2016. – Т. 20. – № 2. – С.14–17. DOI: 10.18412/1816-0395-20162-14-17.

12. Рамазанов А. Ш., Каспарова М. А., Сараева И. В., Атаев Д. Р., Атаев М. Б. Состав, структура и свойства литий-алюминиевого концентрата, выделенного из геотермальной минерализованной воды // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2013. – Т. 56. – Вып. 1. – С. 21–25.

13. Рябцев А. Д., Коцупало Н. П., Кураков А. А., Менжерес Л. Т., Титаренко В. И. Теоретические основы технологии получения карбоната лития аммиачным способом // Теорет. основы хим. технологии. – 2019. – Т. 53. – № 5. – С. 595–600. DOI: 10.1134/S00403 57119040122.

14. Севастьянов О. М. Микроэлементы в подземных водах Оренбургского месторождения // Геология нефти и газа. – 1992. – № 10. – С. 5–6.

15. Novikov D. A., Trifonov N. S. Hydrogeologic implications of industrial effluent disposal of the Yurubcheno-Tokhomo field (Siberian Craton, Russia) // Arabian Journal of Geosciences. – 2016. – V. 9. – No. 1. – P. 1–14, 63.

16. Novikov D. A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – V. 44. – No. 5. – P. 780–788.

17. Chen X., Yang M., Zheng S. et al. Spatially separated crystallization for selective lithium extraction from saline water // Nat Water. – 2023. – V. 1. – P. 808–817.

18. Dutova E., Nikitenkov A., Kuzevanov K. The HydroGeo Software Package and its usage // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98.

19. Siame E, Pascoe D. Extraction of lithium from micaceous waste from China clay production // Minerals Engineering. – 2011. – Т. 24. – № 14. – С. 1595–1602.

© А. Н. Никитенков, Д. А. Новиков, И. И. Юрчик, 2024