

УДК 504.4 + 001.891.873:532.533

## Условия формирования природных поверхностных и подземных вод Кольского Севера (на примере Хибинского массива)

С.И. Мазухина<sup>1</sup>, В.А. Маслобоев<sup>1</sup>, К.В. Чудненко<sup>2</sup>, В.А. Бычинский<sup>2</sup>,  
А.В. Светлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем промышленной экологии Севера РАН, Апатиты

<sup>2</sup> Институт геохимии СО РАН, Иркутск

**Аннотация.** Исследованы процессы формирования поверхностных и подземных вод Хибинского массива с помощью физико-химической модели системы "вода – порода – атмосфера – органическое вещество". Полученные модельные растворы свидетельствуют о том, что формирование поверхностных и подземных вод Хибинского массива в целом происходит в рамках рассмотренной системы без привлечения гипотетического внешнего источника. Результаты имеют практическое и методологическое значение для оценки прогноза антропогенного воздействия на водные системы в условиях Субарктики.

**Abstract.** Processes of surface and underground water formation in the Khibiny massif have been studied using a physical-chemical model of the "water – rock – atmosphere – organic substance" system. The obtained model solutions are indicative of the fact that formation of surface and underground water of the Khibiny massif takes place on the whole in the framework of the considered system without attracting a hypothetical outside source. The results are of practical and methodological importance for assessment of prediction of the man-induced impact on water systems in conditions of Subarctic.

**Ключевые слова:** поверхностные и подземные воды, Хибинский массив, физико-химическая модель, Субарктика

**Key words:** surface and underground waters, Khibiny massif, physical-chemical model, Subarctic

### 1. Введение

Хибинский щелочной массив располагается в центральной части Кольского полуострова между двумя крупными, вытянутыми в меридиональном направлении озерами Имандра и Умбозеро. С севера и востока он граничит с гранито-гнейсами архея, с юга и запада с протерозойскими эффузионно-осадочными породами свиты имандра-варзуга. На юго-востоке и северо-западе он граничит с осадочными породами, условно отнесенными к палеозою (Арманд, 1964; *Минеральные месторождения...*, 1981; *Минералы...*, 1937).

Характерной особенностью Хибинского массива, имеющего кольцевое строение, является то, что свыше 90 % площади массива (1327 км<sup>2</sup>) занимают нефелиновые сиениты, главнейшие разновидности которых представлены хибинитами (внешнее разорванное кольцо) и фойяитами (ядро массива) (рис. 1). Нефелиновые сиениты состоят на 40-60 % из полевого шпата, и на 30-40 % нефелина. В уртитях количество нефелина достигает 75-90 %, в ийолитах – 50-60 % (Икорский, 1967; Икорский и др., 1992). Возраст массива, установленный по рубидий-стронциевой изохроне, составляет 365±13 млн лет (Когарко и др., 1983).

Известно, что нефелиновые сиениты это особый тип породы, пересыщенный щелочными, летучими и редкими элементами (Хомяков, 1990), который характеризуется обилием легко растворимых минералов: карбонатов, фосфатов, фторидов и др. Состав летучих компонентов включает в себя прежде всего F<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, S, а также NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, He, Ag. Фтор, хлор, уголекислота, сера, водород входят в структуру кристаллической решетки апатита, другие компоненты находятся в газовых и газовой-жидких включениях или захвачены субмикроскопическими механическими дефектами (*Минералогия...*, 1978).

Более поздние исследования указывают на необычно высокое содержание метана и тяжелых углеводородов, при подчиненной роли CO<sub>2</sub> (Кривдик и др., 2007). В породах Хибинского массива также обнаружены высокомолекулярные органические соединения (битумы). В битумах, обнаруженных в ийолите, преобладают парафиновые углеводороды с углеводородным числом 29-31, в меньших количествах обнаружены нафтеновые и ароматические углеводороды (Хибинский..., 1972). Кроме указанных веществ в породах Хибинского массива обнаружены макропроявления веществ, представленных широкой гаммой органических соединений, таких как антроксолит, кериты (импсонит, альбертит), асфальтовые вещества (*Минералогия...*, 1978). Графит или самородный углерод образует

сплошные тонкозернистые массы, или мелкочашуйчатые включения в полевом шпате, нефелине, эгирине и сфене (*Минералогия...*, 1978).

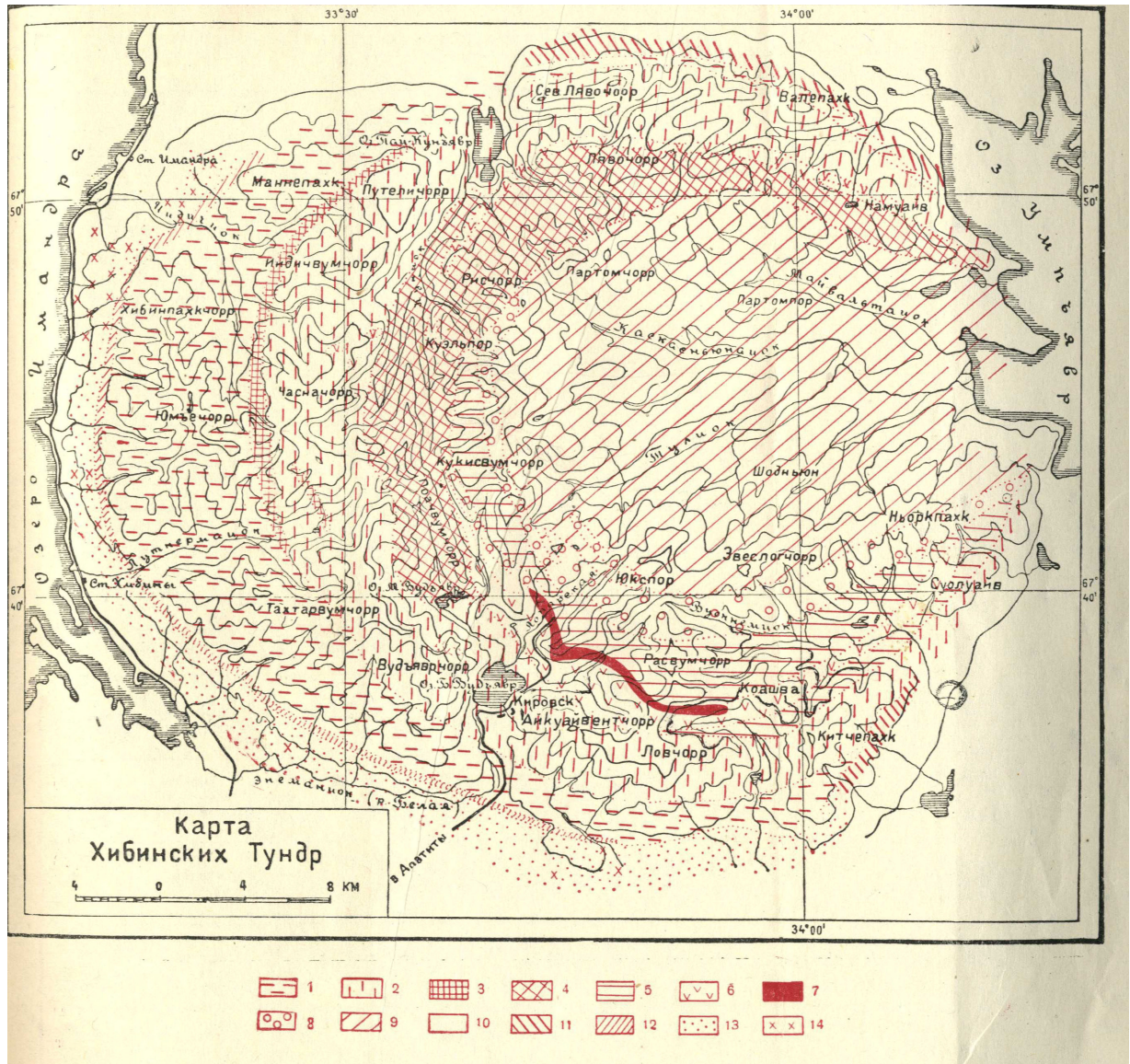


Рис. 1. Петрографическая карта Хибинских тундр (*Минералогия...*, 1978).

- 1 – хибиниты, 2 – трахитоидные хибиниты, 3 – нефелиновые порфиры и жильные породы,
- 4 – пойкилотовый нефелиновый сиенит, 5 – эгириновый среднезернистый нефелиновый сиенит,
- 6 – ийолиты и уртиты, 7 – апатито-нефелиновые породы, 8 – слюдяные и роговообманковые пойкилотовые нефелиновые сиениты, 9 – фойяиты, 10 – луавриты, 11 – архейские гнейсы, 12 – роговики, измененные осадки протерозоя, 13 – зеленокаменные породы свиты Имандра-Варзуга, 14 – имандриты, габбро-диабазы.

В Геологическом институте КНЦ РАН была выполнена работа по созданию средней, "генеральной пробы" Хибинского массива, составленной с учетом площадного распространения пород разных типов. Эта проба проанализирована в 27 лабораториях России (СССР) и зарубежных стран. Полученные данные хорошо согласуются между собой по содержанию главных петрогенных компонентов (*Минералогия...*, 1978). Ниже приведен обобщенный химический состав пород Хибинского массива (мас. %):  $\text{SiO}_2 - 53.116$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 21.218$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2.585$ ;  $\text{FeO} - 1.577$ ;  $\text{MgO} - 0.649$ ;  $\text{CaO} - 1.797$ ;  $\text{Na}_2\text{O} - 9.791$ ;  $\text{K}_2\text{O} - 6.507$ ;  $\text{P}_2\text{O}_5 - 0.288$ ;  $\text{MnO} - 0.18$ ;  $\text{TiO}_2 - 1.048$ ;  $\text{SrO} - 0.126$ ;  $\text{SO}_3 - 0.023$ ;  $\text{F} - 0.123$ ;  $\text{Cl} - 0.036$ ;  $\text{CO}_2 - 0.14$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 0.798$  (*Кухаренко и др.*, 1968).

## 2. Формирование химического состава природных вод в пределах Хибинского массива

Район исследований относится к Балтийскому гидрогеологическому массиву, который характеризуется широким развитием поровых грунтовых вод в четвертичных отложениях, трещинных грунтовых вод в зоне выветривания кристаллических пород и трещинно-жильных напорных вод тектонических трещин на глубине. Для всех типов вод характерны низкие температуры и слабая минерализация.

Основными факторами, определяющими гидрогеологические условия, являются:

- 1) обособленное, резко возвышающееся над окружающей равниной, положение массива;
- 2) сильно расчлененный рельеф и глубоко врезанная речная сеть в пределах массива;
- 3) близкое взаимоположение областей питания и разгрузки подземных вод;
- 4) влажный климат с высоким количеством атмосферных осадков и малым испарением;
- 5) хорошая обнаженность кристаллических пород и развитая трещинная тектоника;
- 6) большая мощность четвертичных отложений в депрессиях кристаллического фундамента.

Подземные воды Хибинского массива принадлежат к зоне свободного водообмена, формирующегося под влиянием дренирующего воздействия речной сети и климатических факторов. К этой зоне относятся как порово-пластовые воды, приуроченные к четвертичным отложениям, так и трещинные (пластово-трещинные и трещинно-жильные) воды кристаллических пород. По условиям питания площадь массива можно разделить на три части:

- 1) области горно-вершинного яруса рельефа, являющиеся пограничными для района работ и характеризующиеся благоприятными условиями питания трещинных и трещинно-жильных вод за счет инфильтрации вод атмосферных осадков, или области основного питания подземных вод;
- 2) области подчиненного питания трещинных и трещинно-жильных вод, приуроченные к крутым, зачастую обрывистым склонам горно-склонового яруса рельефа, где атмосферные осадки, не успевая просачиваться в трещины, быстро стекают в долины в виде поверхностного стока;
- 3) области интенсивного питания вод четвертичных отложений долин и приозерных низменностей за счет атмосферных осадков, выпадающих непосредственно на площади развития четвертичных отложений, поверхностного стока со склонов гор и подтока трещинных вод со стороны бортов и ложа кристаллических пород долин.

Эти участки одновременно являются областями разгрузки подземных вод кристаллических пород и четвертичных отложений (*Отчет о результатах...*, 1999).

Целью настоящей работы является оценка влияния пород Хибинского массива на формирование химического состава поверхностных и подземных вод, формирующихся в его пределах, с помощью физико-химического моделирования (*Чудненко, 2007*). В качестве объектов исследования были выбраны реки, берущие начало в верховьях Хибинского массива (поверхностные воды), и подземные воды из скважин, расположенных в долинах рек.

Процессы формирования поверхностных и подземных вод, формирующихся в пределах Хибинского массива, рассматривались в рамках физико-химической модели (ФХМ) системы "вода – порода – атмосфера – углерод". Исходные данные: химические составы пород Хибинского массива и химические анализы атмосферных и поверхностных вод взяты из работ (*Информационный отчет...*, 2002; *Кухаренко и др.*, 1968; *Хорн, 1972*). Кроме того, учитывались кларковые концентрации S, Cl, F, C (*Кухаренко и др.*, 1968) с целью определения их влияния на процессы формирования химического состава водных растворов.

В ФХМ включено 24 независимых компонента (Al-B-Br-Ar-He-Ne-C-Ca-Cl-F-K-Mg-Mn-N-Na-P-S-Si-Sr-Cu-Zn-H-O-e), 872 зависимых компонента, в том числе, в водном растворе – 295, в газовой фазе – 76, жидких углеводородов – 111, твердых фаз органических и минеральных веществ – 390. Набор твердых фаз мультисистемы сформирован с учетом минерального состава Хибинского массива. Проведено моделирование процессов формирования поверхностных и подземных вод:

1. Исследованы процессы формирования поверхностных вод в системе "вода – порода – атмосфера", в зависимости от степени взаимодействия ( $\xi$ ) пород с водными растворами.

2. С помощью многорезервуарной динамической модели изучена эволюция состава подземных вод. Учитывалась различная скорость выщелачивания компонентов из горных пород при проникновении поверхностных вод на глубину, что позволяет проследить процесс изменения состава вод в подземном пространстве.

Реки района принадлежат бассейну Белого моря. Они имеют небольшие площади водосборов, ступенчатый и сбросовый характер их продольных профилей. Для большинства рек района типичны узкие, слабо разработанные, врезанные в кристаллические породы долины. Следуя направлениям горных разломов, они имеют резкие коленчатые изгибы, многочисленные перепады (стремнины, пороги и

водопады), чередующиеся с тихими спокойными участками (*Отчет о результатах...*, 1999). В связи с этим процесс формирования природных вод рассматривался в 2-х сценариях:

1. взаимодействие "вода – порода" с образованием твердых фаз, что соответствует тихим спокойным участкам рек (*Мазухина, Сандимиров, 2005*);

2. взаимодействие "вода – порода" без образования твердых фаз с введением коэффициентов растворимости на отдельные элементы, что соответствует быстрому течению рек.

В табл. 1 представлены данные мониторинга поверхностных вод района Хибинского массива (*Информационный отчет...*, 2002), в табл. 2 – результаты моделирования процессов взаимодействия "порода – вода – атмосфера" в открытых по отношению к атмосфере условиях. Сопоставляя результаты моделирования (1-ый сценарий) и аналитические данные, можно предположить, что содержания F, Cl, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na, Ca, Sr, Mg и K не выходят за интервал изменения содержания этих элементов в природных водах. Минеральные фазы, существование которых предсказано в физико-химических моделях: мусковит, апатит, гетит, монтмориллонит, иллит, коалинит, гиббсит, аморфный кремнезем – соответствуют новообразованиям минералов, обнаруживаемым в Хибинском щелочном массиве. Во втором сценарии процесс формирования природных вод (взаимодействие "вода – порода") рассматривался как неравновесный. В модели исключалась возможность образования твердых фаз и вводились коэффициенты миграции для Al, Fe, Si, Mn (*Перельман, 1989*). Анализ результатов моделирования (табл. 3) позволяет утверждать, что во 2-ом сценарии содержания Al, K, Fe, Mn, H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> в водном растворе существенно превышают те, которые достигаются в модели при образовании твердых фаз.

Таблица 1. Химический состав поверхностных вод Хибинского массива (по результатам обследования в 2001 г.)

Компоненты мг/л	Нумерация объектов, по которым проведено обследование							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ca <sup>+2</sup>	0-0.25	0.4-0.68	0.5	0.4	0.4-0.6	0.3-0.9	0.1-0.25	0.5-0.6
K <sup>+</sup>	1.27-1.65	1.03-1.98	2.13	1.03	1.03-1.58	1.63-2.49	1.25-2.64	2.49-2.82
Na <sup>+</sup>	4.15-7.85	6.12-8.54	10.95	7.06	7.2-8.79	6.53-8.76	4.5-6.4 5	3.44 -3.57
Mg <sup>+2</sup>	0.05-0.5	0.4-0.75	0.75	0.68	0.5-0.9	0.4 5-0.9	0.25-0.4	0.5-0.6
Mn	0-0.0021	0-0.0035	<0.001	0.015	0-0.0052	0-0.016	0-0.0017	0.0011- 0.0018
Sr	0.0068- 0.044	0.0084- 0.015	0.027	0.01	0.011-0.015	0.0093- 0.031	0.014- 0.026	0.02- 0.025
F	0-0.39	0-0.023	0.28	<0.2	0-0.33	0-0.27	0-0.27	0-0.3
Cl	0.61-1.1	0.77-1.35	1.1	0.86	0.96-1.17	0.96-1.17	0.33-1.1	0. 69-0.75
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	1.65-2.88	2.88-4.94	3.7	4.94	4.12-5.35	2.47 - 4.94	1.65-4.12	3.29-3. 7
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9.15-15.86	13.73- 20.13	29.28	17.86	17.69-20.74	16.47- 22.57	9.15- 17.69	9.76- 10.98
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	4.53-11.73	8.97- 11.69	16.63	9.98	8.87-10.89	10.18 - 13.91	8.4-10.46	10. 01- 10.32
pH	5.56-8.74	5.78-7.36	7.51	7.16	7.1-7.25	6.59-7.58	6.98-7.28	6.89-7.11

Примечание: 1 – р. М. Белая (Лутнерийок) (10 проб), 2 – р. Тульок (5 проб), 3 – правый приток р. Тульок, 4 – родник в верховье р. Тульок, 5 – р. Каскаеннюйок (4 пробы), 6 – р. Тымшаевеуайв с притоками (6 проб), 7 – р. Кунийок (9 проб), 8 – р. Гольцовка (Ингичиок) (2 пробы).

### 3. Формирование подземных вод

Подземные воды исследуемого района образуются в зонах свободного водообмена, формирующегося под влиянием дренирующего воздействия поверхностных вод и климатических факторов. Изучались месторождения подземных вод, расположенных в центральной дуге Хибинского массива (рис. 1), приуроченные к району развития дочетвертичных кристаллических пород и перекрывающих их рыхлых четвертичных отложений, мощность которых изменяется в пределах 10-60 м (*Отчет о результатах...*, 1999; *Пожиленко и др., 2002*). В табл. 4, 5 представлены результаты моделирования поверхностных и подземных вод, формирующихся в долине р. Вудъяврийок и месторождения Олений ручей (рис. 2), в табл. 6 – месторождения Куэльпор.

Месторождение в долине р. Вудъяврийок. Результаты моделирования поверхностных и подземных вод (табл. 4) указывают на сходство их составов по содержанию основных элементов (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, Cl, Ca, K и Na), вместе с тем в подземных водах значения pH и величины содержания Si, Al существенно

Таблица 2. Химический состав поверхностных вод (мг/л) и новообразованных фаз в результате взаимодействия "вода – порода – атмосфера" (t 5 °С. Р 1 бар) ( $\xi$ ) степени взаимодействия вода – порода (3, 2.5, 2, 1.5, 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0)

Порода, г	Алобщ.	Ca <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Sr <sup>+2</sup>	F-	Cl-	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub> *
0.10	6.67E-04	1.28E-03	5.40E-03	7.26E-03	3.91E-04	1.06E-04	2.41E-04	1.84E-03	3.17E-03	1.63E-01	5.31E-02
0.316	4.58E-04	4.06E-03	1.71E-02	2.30E-02	1.24E-03	3.36E-04	7.64E-04	5.81E-03	1.00E-02	1.95E-01	1.68E-01
1.00	1.99E-04	1.28E-02	5.40E-02	7.26E-02	3.91E-03	1.06E-03	2.42E-03	1.84E-02	3.17E-02	3.23E-01	5.31E-01
3.162	7.15E-05	4.06E-02	1.71E-01	2.30E-01	1.24E-02	3.36E-03	7.66E-03	5.81E-02	1.00E-01	8.30E-01	1.36
10.00	2.59E-05	1.28E-01	1.96E-01	6.77E-01	3.91E-02	1.06E-02	2.43E-02	1.84E-01	3.17E-01	1.88E	2.28
15.849	1.35E-05	2.03E-01	3.71E-01	1.06	6.19E-02	1.68E-02	3.84E-02	2.91E-01	5.02E-01	3.02	3.46
25.119	1.12E-05	2.79E-01	4.46E-01	1.71	9.81E-02	2.67E-02	5.69E-02	4.61E-01	7.96E-01	4.58	3.90
39.811	1.24E-05	4.08E-01	4.23E-01	2.78	1.55E-01	4.23E-02	8.69E-02	7.31E-01	1.26	6.95	3.92
63.096	1.49E-05	6.37E-01	4.00E-01	4.48	2.46E-01	6.70E-02	1.37E-01	1.16	1.99	10.8	3.93
100	1.92E-05	1.01	3.70E-01	7.16	3.88E-01	1.06E-01	2.17E-01	1.84	3.15	16.8	3.93
Минеральный состав новообразованных фаз, моль											
	MnO2	Al(OH)3	FeO(OH)	Kln	Illt	Msc	Apt	Mnt	SiO2	pH	
0.1	2.51E-06	3.91E-04	5.43E-05							5.66	
0.316	7.99E-06	1.30E-03	1.72E-04							5.74	
1	2.53E-05	4.15E-03	5.43E-04	1.57E-08	2.75E-08					5.95	
3.162	8.01E-05	7.83E-03	1.72E-03	7.95E-04	1.85E-03	3.96E-08				6.37	
10	2.53E-04		5.43E-03		4.96E-10	8.81E-03		6.52E-03	4.51E-06	6.73	
15.849	4.01E-04		8.61E-03			1.24E-02		1.23E-02	3.45E-05	6.93	
25.119	6.36E-04		1.36E-02			2.33E-02	1.84E-04	1.49E-02	3.25E-02	7.12	
39.811	1.01E-03		2.16E-02			4.42E-02	4.81E-04	1.42E-02	1.02E-01	7.31	
63.096	1.60E-03		3.43E-02			7.69E-02	8.25E-04	1.36E-02	2.11E-01	7.51	
100	2.53E-03		5.43E-02			1.29E-01	1.33E-03	1.29E-02	3.85E-01	7.72	

ПРИМЕЧАНИЕ: содержание кислорода в растворе 12.9 мг/л, Kln – каолинит, Ill – иллит, Apt – апатит, Mnt – монтмориллонит

Таблица 3. Компьютерный аналог взаимодействия вода – порода – атмосфера (линейное ограничение) с ограничением на миграцию Al, Si, Fe (мг/л), соотношение – вода – порода ( $\xi$ ) (1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0)

Порода, г	Al	Ca <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Fe	Mn	Sr <sup>+2</sup>	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	F-	O <sub>2</sub> *	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub> *	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> *	pH
10	1.12E-02	0.128	0.540	0.726	3.91E-02	3.03E-03	1.39E-03	1.06E-02	0.184	0.317	2.33E-02	12.9	2.55	0.216	0.929	6.86
15.849	1.78E-02	0.203	0.856	1.15	6.19E-02	4.81E-03	2.21E-03	1.68E-02	0.291	0.502	3.72E-02	12.9	4.02	0.342	1.47	7.06
25.119	2.82E-02	0.322	1.36	1.82	9.80E-02	7.62E-03	3.49E-03	2.67E-02	0.461	0.795	5.94E-02	12.9	6.33	0.542	2.33	7.27
39.811	4.47E-02	0.509	2.15	2.89	1.55E-01	1.21E-02	5.54E-03	4.23E-02	0.731	1.26	9.51E-02	12.8	100.	0.858	3.69	7.48
63.096	7.09E-02	0.806	3.41	4.58	2.45E-01	1.91E-02	8.78E-03	6.69E-02	1.16	1.99	1.51E-01	12.9	158.	1.36	5.85	7.71
100	1.12E-01	1.27	5.40	7.26	3.88E-01	3.03E-02	1.39E-02	1.06E-01	1.84	3.15	2.41E-01	12.8	24.9	2.15	9.26	7.95

возрастают. В водах скважины 44 сформировались восстановительные условия, поскольку над ней расположено болото, что делает эту систему закрытой относительно атмосферы.

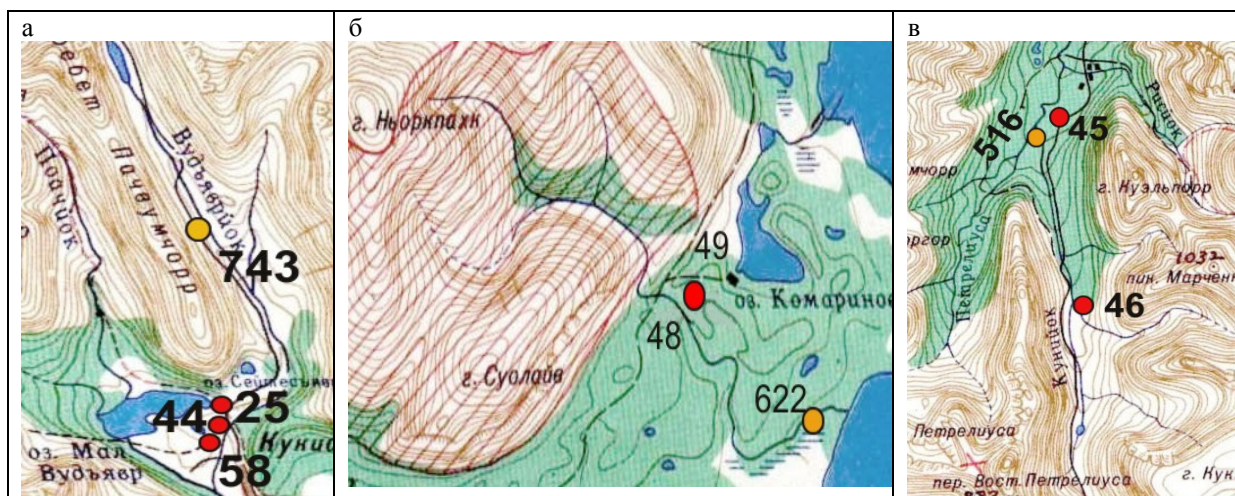


Рис. 2. Карта-схема расположения точек отбора поверхностных и подземных вод:  
а) долина р. Вудъявриок, б) Олений ручей, в) долина реки Кунийок

Таблица 4. Данные мониторинга и результаты моделирования поверхностных и подземных вод в долине реки Вудъявриок

Параметры	Поверхностные воды		Подземные воды					
	Мониторинг	Модель	Данные мониторинга, мг/л			Результаты моделирования, мг/л		
			Скв. 58	Скв. 44	Скв. 25	Скв. 58	Скв. 44	скв. 25
T						5	5	5
P	1					3	3	3
pH	7.36	7.51701	8.28	8.05	8.1	8.26131	8.0898	8.34528
Eh		0.805651				0.755184	-0.25282	0.746706
C		3.90				3.51	3.55	3.50
Al	<0.04		0.1	0.092	0.074	0.100	9.20E-02	7.40E-02
Na+	7.06	7.06				8.16	7.40	7.35
Na+K			9.66	9.2	9.43			
Ca+2	0.2	0.199	0.5	0.6	0.5	0.495	5.95E-01	4.96E-01
K+	2.08	2.08				1.50	1.80	2.08
Mg+2	0.4	0.397	0.12	0.12	0.16	0.119	1.19E-01	1.59E-01
F-			0.3		0.21	0.300		2.10E-01
SO4-2	3.7	3.68	4.53	3.7	3.29	4.51	3.44	3.28
Cl-	1.05	1.05	0.78	1.21	1.35	0.780	1.21	1.35
HCO3-	17.67	18.0	20.13	19.52	19.52	17.4	1.75E+01	1.74E+01
CO2*	0.88	1.26				0.218	3.25E-01	1.79E-01
O2*		10.9				2.24		1.17
NO3-			0.2	0.4	0.3	0.200	4.00E-01	
C						3.51	3.55	3.50
H4SiO4*	7.74	5.63					3.62	4.33
SiO2*		1.31					8.42E-01	1.01
Si				5	6			
Mn	0.001	9.98E-04						
Sr	0.026	2.59E-03						
Н. м			75	80	71			

Примечание: \* – результаты, полученные при 25 °С, пересчитаны на 5 °С (скважины 45 и 46).

Таблица 5. Олений ручей (результаты мониторинга и моделирования) по данным 2001 г.

Параметры	Данные мониторинга			Результаты моделирования		
	Поверхностные воды (622)	Скв. 49	Скв. 48	Поверхностные воды (622)	Скв. 49	Скв. 48
T				5	5	3
P				1	3	3
pH	7.3	6.95	8.99	7.37	6.956	9.04
Eh				0.814	0.830	0.712
Al			0.11			0.110
<b>Ca+2</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.35</b>	<b>1.19</b>	<b>1.29</b>	<b>1.30</b>
K+	2.82	2.07	5.02	2.82	2.07	5.02
Mg+2	2.3	1.55	1.6	2.27	1.53	1.55
Mn+2	0.001	0.001	0.001	9.97E-04	9.98E-04	9.90E-04
<b>Na+</b>	<b>7.07</b>	<b>7.24</b>	<b>11.5</b>	<b>7.07</b>	<b>7.24</b>	<b>11.5</b>
Sr <sup>+2</sup>	0.027	0.019	0.011	2.69E-02	1.89E-02	1.09E-02
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	28.67	23.79	23.16	30.0	26.6	30.6
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	<b>4.12</b>	<b>3.29</b>	<b>10.29</b>	<b>4.05</b>	<b>3.25</b>	<b>10.1</b>
SiO <sub>2</sub> *				1.88	2.07	1.96
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> *	11.13	14.7	12.2	8.11	8.89	8.42
Cl <sup>-</sup>	1.78	1.2	1.45	1.78	1.20	1.45
F <sup>-</sup>					0.399	0.399
O <sub>2</sub> *				12.5	3.53	2.38
P						
C				6.83	7.09	6.26
H. м					22	100

Месторождение Олений ручей. Это месторождение находится вблизи разрабатываемого ныне апатито-нефелинового месторождения "Олений ручей". Скважины 49 и 48 пробурены на разные горизонты четвертичных и кристаллических пород соответственно. На взаимосвязь процессов формирования поверхностных и подземных вод указывает тот факт, что с увеличением глубины возрастают содержания Na, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, K и значения pH, а содержание кислорода снижается (табл. 5). Увеличенные содержания Ca, Mg связаны с близостью расположения апатитового месторождения.

Месторождение Куэльпор. Рассмотренные выше примеры позволяют перейти к разработке резервуарно-динамической модели взаимодействия "вода – порода – атмосфера – органическое вещество" месторождения Куэльпор (рис. 3). В 1-ом резервуаре воды р. Куниок (1000 л) взаимодействуют с атмосферой и органическим веществом, образовавшейся раствор поступает в последующие (2-4) резервуары, представленные нижерасположенными породами, взаимодействуя с ними согласно заданной степени протекания процесса (соотношение вода-порода: 1.0; 0.8; 0.6; 0.2).

Скважина 45 расположена вблизи месторождения Куэльпор, ее воды характеризуются восстановительными условиями, тогда как в анализах скв. 46 наблюдались как окисленные, так и восстановленные воды. Резкое изменение окислительно-восстановительных условий в точке отбора возможно на границах окислительно-восстановительного барьера, или при попадании кислорода в пробу воды в процессе отбора. Сравнивая величины содержаний HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, рассчитанные с помощью ФХМ, и данные мониторинговых исследований, можно было бы предположить, что в водах скважины 46 преобладает окислительная обстановка, так как обычно в восстановительных условиях содержание гидрокарбоната несколько больше. Однако содержание растворенных форм железа и марганца свидетельствуют о восстановительных условиях. Содержание Ca по мере увеличения степени взаимодействия "вода – порода" должно возрастать, однако в скважинах 45 и 46 его

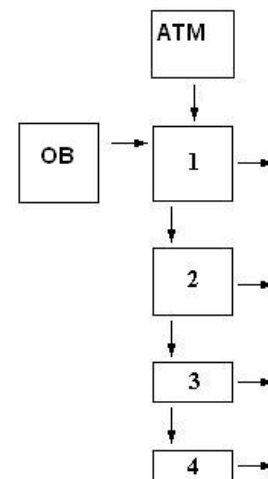


Рис. 3. Принципиальная схема 4-резервуарной имитационной модели взаимодействия "вода-порода-атмосфера-ОВ". АТМ – атмосфера, ОВ – органическое вещество. Стрелками показано движение раствора.

Таблица 6. Результаты моделирования (РМ) и данные мониторинга (ДМ) поверхностных и подземных вод в долине р. Кунийок

Параметры	ДМ (516)	Резервуары				Подземные воды				
		1	2	3	4	ДМ (скв. 45)	РМ (скв. 45)	ДМ (скв. 46)	РМ (скв. 46)	
T, °C		5	5	3	3		3		3	3
P, бар		1	2	2	3		3		3	3
pH	7.26	7.43	7.40	7.39	8.11	8.15	8.145	6.4	6.621	6.6811
Eh, В		0.810	0.811	0.812	-0.222		-0.25		0.844	-0.138
<b>Al</b>		<b>7.56E-06</b>	<b>7.33E-06</b>	<b>5.56E-06</b>	<b>1.34E-05</b>	<b>0.07</b>	<b>7.00E-02</b>	<b>0.24</b>	<b>2.40E-01</b>	<b>2.40E-01</b>
C		3.53	4.15	5.16	7.30		7.14		10.3	11.5
Ca <sup>+2</sup>	0.25	3.57E-01	5.14E-01	7.76E-01	1.46	0.4	3.95E-01	0.15	1.48E-01	1.48E-01
Mg <sup>+2</sup>	0.4	4.36E-01	4.98E-01	5.99E-01	8.61E-01	0.7	6.90E-01	0.3	2.96E-01	2.96E-01
<b>K<sup>+</sup></b>	<b>1.95</b>	<b>1.95</b>	<b>1.94</b>	<b>1.94</b>	<b>1.92</b>		<b>4.13</b>	<b>2.71</b>	<b>2.71</b>	<b>2.71</b>
<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>5.22</b>	<b>5.95</b>	<b>7.12</b>	<b>9.04</b>	<b>14.1</b>	<b>14.37</b>	<b>14.4</b>		<b>12.6</b>	<b>12.6</b>
Fe		7.00E-09	7.16E-09	5.83E-09	5.91E-02			0.07	7.00E-02	7.00E-02
Si <sup>+2</sup>	0.016	2.66E-02	4.37E-02	7.17E-02	1.45E-01	0.016	1.59E-02	0.0076	7.57E-03	7.57E-03
CO <sub>2</sub> <sup>0</sup>	0.88	1.36	1.71	2.27	6.81E-01	0.88	6.05E-01	0.86	16.8	17.3
O <sub>2</sub> <sup>0</sup>		10.5	8.82	6.09					1.15	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	17.67	<b>16.0</b>	<b>18.7</b>	<b>23.0</b>	<b>36.0</b>	<b>35.99</b>	<b>35.3</b>	<b>28.04</b>	<b>29.1</b>	<b>34.6</b>
F <sup>-</sup>		<b>2.25E-02</b>	<b>5.71E-02</b>	<b>1.14E-01</b>	<b>2.64E-01</b>	<b>1.55</b>	<b>1.55</b>	<b>0.76</b>	<b>6.41E-01</b>	<b>6.41E-01</b>
Cl <sup>-</sup>	0.78	<b>9.64E-01</b>	<b>1.26</b>	<b>1.75</b>	<b>3.01</b>	<b>2.2</b>	<b>2.20</b>	<b>0.58</b>	<b>5.80E-01</b>	<b>5.80E-01</b>
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	<b>2.88</b>	<b>3.18</b>	<b>3.69</b>	<b>4.51</b>	<b>5.82</b>	<b>4.12</b>	<b>4.01</b>		<b>4.92</b>	<b>4.92</b>
SiO <sub>2</sub> <sup>0</sup>		3.93	3.93	3.44	3.44		1.98		1.38	1.38
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	9.18					12.25	9.00	8.49	6.27	6.27
P		3.78E-03	1.68E-03	7.13E-04	2.34E-05	0.03	3.00E-02			
Mn					1.23E-01	<0.001		0.0032	3.2E-3	3.2E-3
SiO <sub>2</sub>		7.66E-02	1.12E-01	1.12E-01	3.85E-01					
FeS <sub>2</sub>					4.03E-03					
FeO(OH)		5.43E-03	1.13E-02	1.93E-02						
FeCO <sub>3</sub>					3.89E-2					
Apt		9.48E-05	2.84E-04	4.92E-04	1.11E-3					
Msc		1.39E-02	2.89E-02	4.93E-02	1.12E-01					
MnO <sub>2</sub>		2.53E-04	5.28E-04	9.00E-04						

Примечание: жирным шрифтом выделены соединения, элементы и их концентрации, для которых получена наилучшая сходимость результатов моделирования и данных мониторинга; Apt – апатит, Msc – мусковит



содержания невелики (табл. 6). Среди новообразованных фаз обнаружены апатит, мусковит, аморфный кремнезем,  $MnO_2$ ,  $Fe(OH)_3$ . В работе (Линник, Набиванец, 1986) показано, что продолжительность окисления Fe(II) в чистых растворах не превышает несколько минут. Окисление Mn(II) в подобных условиях длится часами и даже сутками, при этом с увеличением pH водной среды его скорость резко возрастает. Отметим, что содержание железа, рассчитанное с помощью модели взаимодействия "вода – порода – углерод", совпадает с результатами химических анализов вод из скв. 46 (табл. 6). Поскольку в зоне гипергенеза доминирует окислительная геохимическая обстановка, препятствующая накоплению железа ( $Fe^{+2}$ ) в водах, полное равновесие с сидеритом никогда не достигается. Однако на глубине 100-200 м в водоносных горизонтах, изолированных водоупорами от воздействия атмосферных осадков, формируются восстановительные условия, способствующие накоплению растворенных форм железа (Геологическая эволюция, 2007; Шварцев, 1998). Таким образом, с помощью ФХМ подтверждено сделанное на основании мониторинговых исследований предположение о том, что на глубинах более 100 м формируются условия, способствующие накоплению железа и марганца в водах.

Следовательно, можно утверждать, что на больших глубинах, создаются восстановительные условия, способствующие переходу в раствор Al, Fe, Mn и других поливалентных элементов. Поскольку воды, распространенные в коренных породах и четвертичных отложениях, образуют взаимосвязанные водоносные горизонты (Хибинский..., 1972), усиленная эксплуатация водоносных скважин может привести к "подсосу" некондиционных вод из глубин.

Следует обратить внимание на сравнительно высокие концентрации фтора (скв. 45). Установлено, что в присутствии Al в растворе возрастает растворимость флюорита, а увеличение в водах концентраций  $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$  способствует извлечению фтора из пород. С другой стороны, поскольку растворимость  $CaF_2$  минимальна ( $IP_{CaF_2} = n \cdot 10^{-11}$ ), содержание фтора в подземных водах не связано с изменением содержания Ca. Однако вследствие высокой растворимости NaF (при 20°C – 42.8 г/кг) увеличение содержания Na в водах скв. 45 приводит к возрастанию в них содержания F. В связи с различной растворимостью фторидов натрия и кальция его содержание в водах зависит от величины соотношения Na/Ca. Поэтому карбонатные  $HCO_3^- - Na$  воды благоприятны для извлечения F из пород и его накопления в водных растворах (Крайнов, Швеи, 1980; Крайнов и др., 2004).

#### 4. Заключение

Мониторинг природных вод, выполненный в пределах Хибинского массива, позволил получить надежные анализы химического состава поверхностных и подземных вод. Особое внимание было уделено подбору параметров, определяющих существование полного и метастабильного равновесия в рассматриваемой системе.

В результате выполненного термодинамического моделирования установлено, что эволюция химического состава природных вод, взаимодействующих с породами Хибинского массива, содержащими кларковые концентрации фтора, хлора, углерода и серы, приводит к увеличению натрий-углекисло-хлоридно-сульфатной составляющих водного раствора.

Полученные модельные растворы свидетельствуют о том, что формирование поверхностных и подземных вод Хибинского массива в целом происходит в рамках рассмотренной системы без привлечения гипотетического внешнего источника. Следовательно, два сценария модели позволяют адекватно описать закономерности формирования состава природных вод как результат взаимодействия "вода – порода – атмосфера".

#### Литература

- Арманд А.Д. Развитие рельефа Хибин и прихибинской равнины. *Апатиты, КФАН СССР*, 244 с., 1964.  
Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. В 5 т. *Новосибирск, СО РАН*, т.1, 244 с., 2005; т. 2, 389 с., 2007.
- Информационный отчет по ведению мониторинга вод в районе деятельности ОАО Апатит в (2000-2001 гг.). *Ответственный исполнитель Заозерская С.Д. Апатиты*, № 5759, 2002.
- Икорский С.В. Органическое вещество в минералах изверженных горных пород (на примере Хибинского щелочного массива). *Л., Наука*, 120 с., 1967.
- Икорский С.В., Нивин В.А., Припачкин В.А. Геохимия газов эндогенных образований. *СПб., Наука*, 179 с., 1992.
- Когарко Л.Н., Крамм У., Грауэрт Б. Новые данные о возрасте и генезисе щелочных пород Ловозерского массива (изотопия рубидия и стронция). *Докл. АН СССР*, т.268, № 4, с.970-972, 1983.
- Крайнов С.Р., Швеи В.М. Основы геохимии подземных вод. *М., Недра*, 285 с., 1980.

- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Соломин Г.А.** Физико-химическое компьютерное моделирование качества подземных вод: фундаментальные основы. Фтороносные воды. *Геохимия*, № 3, с.319-331, 2004.
- Кривдик С.Г., Нивин В.А., Кульчицкая А.А., Возняк Д.К., Калиниченко А.М., Загнитко В.Н., Дубина А.В.** Углеводороды и другие летучие компоненты в щелочных породах Украинского щита и Кольского полуострова. *Геохимия*, с.307-332, 2007.
- Кухаренко А.А., Ильинский Г.А., Иванова Т.Н.** Кларки Хибинского щелочного массива. *Зап. Всесоюз. минер. об-ва*, ч.97, вып. 2, с.133-148, 1968.
- Линник П.Н., Набиванец Б.И.** Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. *Л., Гидрометеоиздат*, 270 с., 1986.
- Мазухина С.И., Сандимиров С.С.** Применение физико-химического моделирования для решения экологических задач Кольского Севера. *Апатиты, КНЦ РАН*, 106 с., 2005.
- Минеральные месторождения Кольского полуострова. *Сост.: Горбунов Г.И., Бельков И.В., Макиевский С.И. Л., Наука*, 272 с., 1981.
- Минералогия Хибинского массива. *М., Наука*, т.1, 228 с.; т.2, 586 с., 1978.
- Минералы Хибинских и Ловозерских тундр. *М.-Л., АН СССР*, 563 с., 1937.
- Отчет о результатах разведки подземных вод для водоснабжения г. Кировска Мурманской области за 1991-1998 гг. (с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.1999 г.). Фонды Комитета природных ресурсов по Мурманской области. *Ответственный исполнитель Максимова Н.А. Мурманск*, № 5270, 1999.
- Перельман А.И.** Геохимия. Учеб. для геол. спец. вузов. *М., Высш. шк.*, 528 с., 1989.
- Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В.** Геология рудных районов Мурманской области. *Апатиты, КНЦ РАН*, 359 с., 2002.
- Хомяков А.П.** Минералогия ультраапатитовых щелочных пород. *М., Наука*, 200 с., 1990.
- Шварцев С.Л.** Гидрогеохимия зоны гипергенеза. *М., Недра*, 366 с., 1998.
- Чудненко К.В.** Теория и программное обеспечение метода минимизации термодинамических потенциалов для решения геохимических задач. *Автореф. дисс. докт. геол.-мин. наук. Иркутск*, 54 с., 2007.
- Хибинский щелочной массив. *Л., Недра*, 176 с., 1972.
- Хорн Р.** Морская химия (структура воды и химия гидросферы). *М., Мир*, 399 с., 1972.