

конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» в 3 т. — Новосибирск: СГУГиТ, 2015. — Т. 2. — С. 151–155.

3. Захаркин А.К., Бубнов В.М., Крыжановский В.А., Тарло Н.Н. Магнитная вязкость горных пород — новый осложняющий фактор метода ЗСБ / Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля. — Новосибирск, СНИИГГиМС, 1988. — С. 19–26.

4. Кожеников Н.О., Снопков С.В. Магнитная вязкость траппов и ее связь с аномалиями электромагнитного поля в методе переходных процессов (Якутская кимберлитовая провинция) // Геология и геофизика. — 1995. — Т. 36(5). — С. 91–102.

5. Могилатов В.С., Захаркин А.К., Злобинский А.В. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор». — Новосибирск: НП Академ. изд-во «Гео», 2007. — С. 155.

© Коллектив авторов, 2016

Великин Александр Борисович // avelikin@mail.ru

Великин Алексей Александрович // aavelikin@mail.ru

Алексеев Евгений Петрович // geo@geolraz.com

Королев Алексей Александрович // koroleff210@rambler.ru

Черныш Владимир Юльевич // vlachernysh@yandex.ru

## ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 556+624.131

Ермолаева А.В., Строкова Л.А. (Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

### ОЦЕНКА КАРСТОВОГО ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

*Рассмотрено влияние химического состава подземных вод на развитие карстового процесса. По имеющимся данным инженерно-геологических изысканий начального участка проектируемого магистрального газопровода «Сила Сибири» (участок Чаянда-Ленск) произведен расчет индекса неравновесности вод по отношению к кальциту. Установлены зависимости между геоморфологическими особенностями рельефа и агрессивностью природных вод. **Ключевые слова:** грунтовые воды, карст, химический состав, равновесие.*

Ermolaeva A.V., Strokova L.A. (Tomsk Polytechnic University)

### EVALUATION OF KARST PROCESS BY USING CHEMICAL CHARACTERISTICS OF WATERS IN THE CONSTRUCTION OF MAIN GAS PIPELINES

*This study focuses on the use of geotechnical information to identify the effect of chemical composition of ground water in karst development process. We calculated an index of non-equilibrium water relative to calcite according to available data of geotechnical investigations for the designed main gas pipeline «Power of Siberia» (first section Chayanda-Lensk). It is analyzed the relationship between geomorphological features of the terrain and aggressiveness of natural waters. **Key words:** shallow groundwater, karst, chemical composition, equilibrium.*

На сегодняшний день ключевыми критериями, предъявляемыми к газотранспортным системам, являются промышленная и экологическая безопасности. Как правило, эксплуатация магистральных газопроводов протекает в сложных динамических, инженерно-геологических и природно-климатических условиях. Особые трудности возникают при строительстве объектов трубопроводного транспорта на закарстованных территориях ввиду сложности идентификации и прогнозирования развития процесса. Источниками разрушения газопро-

водов в этих случаях являются механические напряжения, превысившие предел прочности металла трубопровода, возникшие вследствие просадки грунта в зоне карстовой воронки. Можно выделить следующие факторы, способствующие возникновению отказов:

недооценка опасности процесса на стадии проектирования;

отступление от проектных решений при строительстве.

Одной из ключевых проблем в методике изучения и оценки закарстованных территорий считается оценка опасности карстового процесса. Действующие в России строительные нормы предписывают в качестве единственных количественных критериев оценки карстовой опасности интенсивность образования карстовых провалов и их средние диаметры, причем это касается как инженерно-геологических изысканий, так и выбора защитных мероприятий, хотя иногда на этот счет высказываются обоснованные сомнения [7, 8].

В результате анализа исследований, проводимых как в России, так и за рубежом [3, 5, 11], можно выделить ряд признаков, характеризующих карстовую опасность:

наличие поверхностных форм карста;

растворяющая способность природных вод;

наличие зоны разуплотненных грунтов, фиксируемых по геоэлектрическим и скоростным аномалиям;

интенсивная вертикальная фильтрация;

наличие (отсутствие) водоупора, перекрывающего растворимые породы.

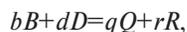
Среди этих данных можно отметить признак, характеризующий прогноз развития карстового процесса во времени-пространстве: агрессивность природных вод. Так как данный признак описывает «поведение» и интенсивность процесса в целом, то оценка на его основе перспективна не только на этапе проектирования, но и на этапе эксплуатации магистрального газопровода.

В естественных условиях система «вода-порода» носит равновесно-неравновесный характер. Согласно данному положению вода, независимо от глубины залегания и скорости движения, всегда не равновесна с одними минералами, растворяя их, но равновесна с другими, которые формирует. В настоящий момент теория взаимодействия воды с горными породами относительно детально разработана с общих геохимиче-

ских позиций, экспериментального моделирования алюмосиликатов, физико-химического моделирования процессов выветривания и т.д. Физико-химические методы исследований получили свое развитие, благодаря работам Х.К. Хелгесона, Р.М. Гаррелса, Ч.Л. Крайста, Т. Пачеса, И. Тарди, М.Е. Томсона, И.К. Карпова, В.А. Жарикова, С.П. Крайнова, Г.Б. Наумова, Б.П. Рыженко, Ю.В. Шварова. Применены же эти методы на практике С.Л. Шварцев, В.П. Зверев, В.Н. Озябкин, С.А. Юшков и др. [4, 9].

Взаимодействие между породами и природными водами, направленное к равновесию с гидрохимической средой, приводящее к изменению минерального вещества, можно рассматривать как отдельные химические реакции. Начальными продуктами этих реакций являются какие-либо определенные минералы и вода, конечными — минералы, возникающие как продукт изменения первых.

В общем виде любая реакция взаимодействия может быть выражена следующим схематическим уравнением:



где  $b, d, q, r$  — стехиометрические коэффициенты исходных веществ ( $B, D$ ) и продуктов реакции ( $Q, R$ ).

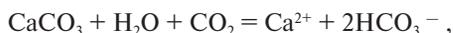
Для выяснения степени изменения насыщенности природных вод исследуемой территории относительно кальцита с изменением степени их солености и щелочности обычно используется индекс неравновесности [4]. Индекс неравновесности ( $A$ ) представляет собой отношение теоретического произведения активностей компонентов реакции, описывающей определенную стадию взаимодействия системы «вода-порода» к фактическому, наблюдаемому в водах произведению активностей этих компонентов и определяется по формуле

$$A = \lg \frac{K}{Q},$$

где  $K$  — термодинамическая константа реакции растворения породы или минерала;  $Q$  — квотант реакции, представляющий собой отношения фактического произведения активностей продуктов реакции, отнесенного к произведению активностей исходных веществ [2].

По мере насыщения вод относительно какого-либо соединения индекс неравновесности уменьшается, стремясь к нулю, при пересыщении вод вторичными минералами его значения становятся отрицательными; нулевое значение характеризует равновесное состояние.

В случае кальцита равновесие воды с минералом контролируется реакцией:



константа которой при 25 °С равна  $10^{-5,8}$ , тогда как среднее значение квотанта этой реакции в разных ландшафтных зонах изменяется от  $10^{-5,1}$  до  $10^{-10,1}$ , а индекс неравновесности — соответственно от  $-0,5$  до  $+4,5$ .

Существует четкая обратная пропорциональная зависимость, имеющая место между индексом неравновесности и общей минерализацией воды. В общем случае по мере увеличения солености раствора степень его на-

сыщения относительно кальцита возрастает, и при минерализации 0,6 г/л индекс неравновесности становится равным нулю, т.е. достигается равновесие. Аналогичная зависимость рассматриваемого индекса устанавливается и с величиной рН: по мере увеличения щелочности раствора индекс неравновесности уменьшается и при рН 7,4 становится равным нулю, т.е. достигается равновесие воды с кальцитом. Таким образом, подземные воды, имеющие минерализацию более 0,6 г/л и одновременно рН более 7,4, как правило, насыщены карбонатом кальция, который в этих условиях не только не растворяется, но, наоборот, высаживается из раствора [9].

Таким образом, по индексу неравновесности можно оценить вероятность развития карстового процесса на участках магистральных газопроводов.

#### Краткая характеристика района

Используя вышеописанную методику, нами были проведены расчеты по изучению равновесно-неравновесного состояния системы «вода-порода» на начальном участке строящегося газопровода «Сила Сибири» — Чайандинское нефтегазоконденсатное месторождение — Ленск, протяженностью 160 км. В качестве исходных данных для расчета используются лабораторные исследования состава вод, отобранных в период 2010–2012 гг. Результаты лабораторных анализов вод представлены в табл. 1.

В климатическом отношении участок трассы магистрального газопровода проходит в условиях резкоконтинентального климата с умеренно-теплым летом и суровой, относительно малоснежной зимой. Основными факторами, определяющими характер климата, являются: удаленность и отгороженность горными системами от Атлантического и Тихого океанов, открытость со стороны Северного Ледовитого океана, сложность орографии. Зимой вся территория охлаждена, что способствует развитию с октября по март устойчивого мощного антициклона (Азиатский максимум). Средние температуры в январе составляют от  $-25,2$  до  $-34$  °С, в июле —  $12-16$  °С.

В холодный период (ноябрь–март) выпадает 85–116 мм осадков, в летне-осенний период (апрель–октябрь) их количество увеличивается до 262–294 мм. Годовое количество осадков составляет 346–409 мм, большая их часть (72–75 %) выпадает в теплый период. Общее количество осадков, выпадающих в виде снега, составляет около 25 % от годового значения.

Трасса магистрального газопровода на рассматриваемом участке пересекает 16 постоянных водных объектов. Все пересекаемые водотоки относятся к бассейну Северного Ледовитого океана. Годовой гидрограф рек характеризуется высоким половодьем, высокими дождевыми паводками в летний период и глубокой зимней меженью. Реки района имеют смешанное питание, причем преобладающим является подземный приток — 35–45 %, снеговое питание составляет 25–40 %, дождевое — 20–30 %.

В геоморфологическом отношении трасса газопровода пролегает в пределах Приленского структурно-денудационного плато, граничащего на юго-востоке с Патомским нагорьем, на севере и северо-востоке — с Лено-Вилуйской впадиной. Поверхность плато воз-

вышается на 400–600 м над уровнем моря и полого наклонена на северо-запад. Максимальные абсолютные отметки наблюдаются на водоразделе Бюгоех — 554 м, а минимальные — в долине р. Киенг-Юрях — 243 м.

По преобладанию рельефообразующих экзогенных факторов на территории выделяются два основных генетических типа рельефа — эрозионно-денудационный и эрозионно-аккумулятивный. Развитие в основном положительных неотектонических структур на исследуемой территории предопределило господство денудационных процессов над аккумулятивными, мощность чехла дисперсных отложений редко превышает 3–5 м на междуречьях и увеличивается до 5–10 м в долинах рек.

В тектоническом отношении проектируемая трасса газопровода Чайнда-Ленск располагается в южной части Сибирской платформы, начинается в пределах Непского свода Непско-Ботуобинской антеклизы и заканчивается в пределах Предпатомского прогиба. Территория сложена отложениями кембрия и ордовика, смятыми в протяженные гребневидные складки, простирающиеся в северо-восточном направлении вдоль границы Байкало-Патомского покровно-скаччатого сооружения. Складки осложнены многочисленными разрывами, преимущественно надвигами, падающими на юго-восток. Встречаются также поперечные крутопадающие разрывы субмеридионального простирания.

**Таблица 1**  
**Химический состав исследуемых природных вод**

№ скважины / т.набл.	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Mg <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	(HCO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	(SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Общ. жесткость, мг-экв/дм <sup>3</sup>	pH, ед. pH	Минерализация, г/дм <sup>3</sup>	Индекс неравновесности (Ca)
101	4.8	6.1	26.1	8.5	85.4	0.0	1.8	7.4	0.2	-1.6
103	11.0	6.3	38.1	15.6	122.0	25.0	2.4	7.6	0.2	-0.4
211	44.2	46.2	100.2	53.3	451.4	93.1	8.8	7.4	0.8	1.0
156	36.3	31.6	80.2	21.3	378.2	69.1	6.6	6.6	0.6	-1.1
6943	15.6	14.6	100.0	6.3	270.9	25.0	6.2	7.2	0.4	0.3
6969	1.8	9.7	68.1	5.7	219.6	25.0	4.2	8.0	0.2	1.6
17	32.3	66.9	178.8	7.1	297.7	538.8	14.4	7.0	1.1	0.1
35	16.2	31.6	152.7	5.7	351.4	212.2	10.2	7.0	0.8	0.4
36	24.8	22.9	91.9	4.3	405.0	37.8	6.5	7.0	0.6	0.1
38	31.6	24.1	95.8	5.7	400.2	68.3	6.8	7.0	0.6	0.1
42	28.4	13.9	95.8	11.4	395.3	17.3	5.9	7.0	0.6	0.2
43	17.4	23.5	115.6	4.3	488.0	16.5	7.7	7.1	0.7	0.8
54а	29.9	15.1	62.2	5.7	292.8	32.9	4.3	7.2	0.4	0.0
74	32.4	18.9	56.3	28.5	292.8	8.2	4.4	6.5	0.4	-1.7
85	24.3	27.4	53.0	40.0	280.6	10.7	4.9	6.7	0.4	-1.4
1034	2.0	49.0	62.0	13.4	415.0	0.0	7.1	7.2	0.5	0.2
1352	4.6	38.0	44.0	2.2	329.0	0.0	5.3	7.1	0.4	-0.5
2152	5.2	54.0	66.0	4.8	451.0	0.0	7.2	7.0	0.6	-0.2
2207	7.7	36.0	88.0	2.2	464.0	0.0	7.4	7.0	0.6	0.3
2211	3.2	34.0	46.0	2.4	305.0	0.0	5.1	7.4	0.4	0.1
2225	4.5	34.0	48.0	1.8	305.0	0.0	5.2	6.7	0.4	-1.3
2255	3.7	18.0	28.0	3.0	159.0	0.0	2.9	7.1	0.2	-1.6
2278	6.9	29.0	50.0	2.0	305.0	0.0	4.9	7.3	0.4	-1.1

На двух участках трасса проходит по юрским отложениям, перекрывающим нижнепалеозойские отложения с угловым несогласием. Местами юрские отложения запечатывают разрывы, нарушающие кембрийско-ордовиковские толщи, что свидетельствует о пассивности разрывов в послееорское время.

В пределах полосы проектируемого газопровода распространены осадочные формации коренных пород, среди которых выделяются: 1) карбонатная нижнекембрийская и среднекембрийская; 2) терригенно-карбонатная средне-верхнекембрийская, нижнеордовикская и средне-верхнеордовикская; 3) терригенная нижнеюрская [6].

**Карбонатная** формация имеет широкое распространение в полосе трассы и представлена известняками и доломитами мощностью 450–1000 м. Породы трещиноваты, кавернозны и закарстованы.

**Терригенно-карбонатная** формация представлена пестроцветными аргиллитами, алевролитами, мергелями и доломитами мощностью 580–640 м.

**Терригенная** формация представлена песками с прослоями песчаников и конгломератов, мощность этих отложений относительно невелика — не более 90 м, распространены на весьма ограниченных по площади участках в районе руч. Чуонда в восточной части трассы и р. Бачанга на северо-западе.

Трасса проложена по территории, которая относится к зоне массивно-островного распространения много-

летнемерзлых пород (ММП). Площадь развития ММП составляет от 40 до 80 %. Наибольшая мощность мерзлой зоны на равнинах и плато составляет 100–250 м.

Подземные воды на данном участке характеризуются спорадическим распространением. Воды, приуроченные к делювиальным отложениям склонов, маломощные и малобитные, вскрываются на глубине 3–5 м, по составу гидрокарбонатные, магниевые-кальциевые, натриево-магниевые-кальциевые. Среда вод нейтральная и слабощелочная. Водоупором являются скальные и полускальные грунты, иногда многолетние мерзлые грунты.

В областях развития пород карбонатной формации широко распространены карстовые формы. Развитию карстовых процессов способствует глубокое расчленение территории и трещиноватость массива пород. Образование карста связано с химическим растворением

карбонатных пород поверхностными и подземными водами, которое активно протекает по ослабленным трещиноватым зонам. В петрографическом составе кембрийских карбонатов присутствуют гипсы и ангидриты, доломиты, известняки, в связи с этим варьирование по мощности и в плане закарстованных толщ достаточно велико.

Воды, приуроченные к делювиально-пролювиальным отложениям склонов, связаны с надмерзлотными и межмерзлотными таликами. Водонасыщенные грунты представлены дресвяными суглинками или глыбовыми грунтами.

Низкая плотность населения, суровость климата, отсутствие инфраструктуры, недостаток наблюдений за карстовыми проявлениями — все эти обстоятельства являются серьезным вызовом, поскольку эксплуатация инженерного сооружения постоянно нуждается в прогнозе и оперативном проведении защитных мероприятий, которые не всегда удается предусмотреть в проекте. Именно поэтому особая роль отводится созданию действующих компьютерных моделей, описывающих взаимодействие в системе «вода–порода».

### Результаты исследований и их обсуждение

Для оценки характера и поведения подземных вод с горными породами на исследуемом участке по данным опробования произведены расчеты показателей равновесно-неравновесного состояния системы «вода–порода». Расчет произведен по 23 имеющимся результатам химических анализов воды, отобранных из скважин и поверхностных водотоков на исследуемом участке в ходе инженерно-геологических изысканий. Обобщенная характеристика проб воды представлена на рис. 1.

В основу расчетов для прогнозирования поведения карбонатных пород в карстующихся водах был принят термодинамический подход Р.М. Гаррелса и Ч.Л. Крайста [2].

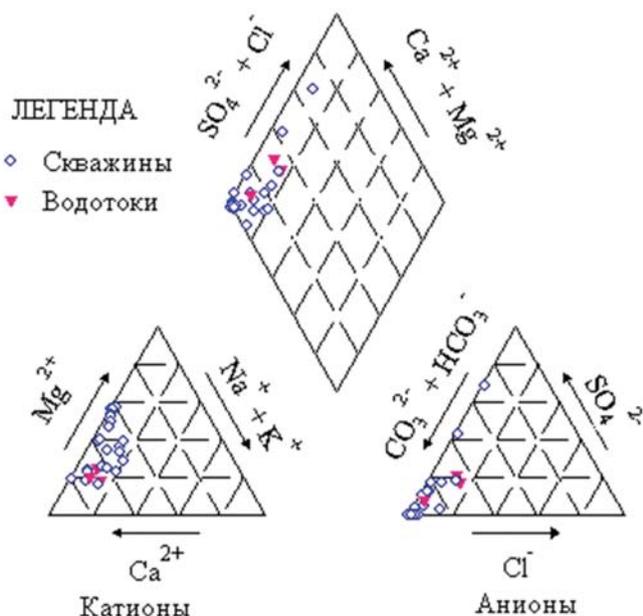


Рис. 1. Диаграмма Пайпера [10] с нанесением данных по составу вод района: 1 — скважины; 2 — водотоки

Таблица 2  
Результаты расчета индекса неравновесности

№ точки опробования (скв./т.н.)	Минерализация, г/дм³	Индекс неравновесности $\theta$ (Ca)	Абс. Отм. Т.н., Н, м	pH
101	0,153	-1,6	247,89	7,38
103	0,219	-0,4	243,27	7,6
211	0,791	0,99	461,74	7,35
156	0,618	-1,1	244,31	6,59
6943	0,356	0,26	357,2	7,2
17	1,13	0,13	387,88	7
35	0,8	0,42	439,33	7,04
36	0,6	0,072	434,87	6,99
38	0,6	0,1	433,75	7
42	0,6	0,23	423,31	7
43	0,7	0,78	424,03	7,13
54a	0,4	-0,035	344,71	7,22
74	0,4	-1,7	416,50	6,54
85	0,4	-1,4	396,50	6,71
1034	0,548	0,2	347,45	7,2
1352	0,425	-0,54	414,95	7,01
2152	0,589	-0,15	458,3	6,99
2207	0,605	0,27	277,5	7,04
2211	0,395	0,13	276,5	7,4
2225	0,401	-1,3	276,08	6,74
2255	0,22	-1,6	253,67	7,08
2278	0,4	-1,1	255,87	7,33
2246	0,451		271,72	6,95

Оценка равновесия в системе «кальциты-подземные воды» производилась с использованием программного комплекса HydroGeo, разработанного М.Б. Букаты (1999).

В систему расчетов были приняты: вода и такие базовые ионы, как  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$ ,  $Cl^-$ ,  $(HCO_3^-)$ ,  $(SO_4^{2-})$ ; ассоциаты:  $(CO_3^{2-})$ ,  $H_2CO_3$ ,  $(CO)^{2+}$ ,  $CO_2$ ,  $NaHCO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $(NaCO_3)^-$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $(NaSO_4)^-$ ,  $NaHSO_4$ ,  $NaCl$ ,  $NaOH$ ,  $Mg(HCO_3)_2$ ,  $(MgHCO_3)^+$ ,  $(Mg(CO_3)_2)^{2-}$ ,  $MgCO_3$ ,  $MgSO_4$ ,  $(Mg(SO_4)_2)^{2-}$ ,  $(MgHSO_4)^+$ ,  $Mg(HSO_4)^2$ ,  $MgCl^+$ ,  $MgCl_2$ ,  $Mg(OH)_2$ ,  $MgOH^+$ ,  $H_2SO_4$ ,  $(HSO_4)^-$ ,  $HCl$ ,  $(CaHCO_3)^+$ ,  $Ca(HCO_3)_2$ ,  $(Ca(CO_3)_2)^{2-}$ ,  $CaCO_3$ ,  $(Ca(SO_4)_2)^{2-}$ ,  $CaSO_4$ ,  $Ca(HSO_4)_2$ ,  $(CaHSO_4)^+$ ,  $CaCl^+$ ,  $CaCl_2$ ,  $CaOH^+$ ,  $Ca(OH)_2$ ; следующие минералы  $MgCO_3$  (сог.) — магнезит(сог.),  $MgCO_3$  — магнезит,  $CaCO_3$  к — кальцит,  $CaCO_3$  к (IV) — кальцит-IV,  $CaCO_3$  а — арагонит,  $CaMg(CO_3)_2$  н — доломит (неупор.),  $CaMg(CO_3)_2$  у — доломит (упоряд.),  $CaMg_3(CO_3)_4$  — гунтит,  $CaMg(CO_3)_2$  — доломит,  $NaHCO_3$  — нахколит [1].

По результатам произведенных расчетов равновесия кальцита к изучаемым водам, была выведена корреляционная зависимость, которая позволила оценить возможность карстопоявлений на исследуемой территории.

По полученным данным был построен график зависимости индекса неравновесности  $CaCO_3$  от величины минерализации (рис. 2). Связь описывалась линейным уравнением с коэффициентом корреляции  $R'' = 0,38$ . Анализируя график, делаем вывод, что воды с минера-

лизацией свыше 0,66 г/л насыщены к кальциту и в этих участках опробования воды угрозы процессу карстообразования либо нет, либо процесс будет иметь пассивный характер.

При анализе зависимости индекса неравновесности и рН данной территории (рис. 3) выяснилось, что воды на исследуемой территории являются слабощелочными, величина рН колеблется от 6,5 до 7,8. В тех точках опробования, где величина рН свыше 7,35 воды, вероятно, являются насыщенными к кальциту, угрозы к карстообразованию нет.

Для более точного прогноза карстовой опасности целесообразно выявить зависимость между значением индекса неравновесности и особенностями рельефа в зоне проектирования. Для выявления данной зависимости была проанализирована зависимость между индексом неравновесности и абсолютными отметками точек опробования (рис. 4). В скважинах глубина отбора проб воды изменялась от 1,5 до 4,5 м, в среднем 2,5 м от поверхности земли.

По графику прослеживается зависимость, показывающая, что при понижении рельефа наблюдается возрастание агрессивности природных вод. Таким образом, можно сделать вывод о том, что агрессивность подземных вод напрямую связана с их происхождением и их условиями формирования. Так, отрицательным значениям индекса неравновесности по отношению к кальциту соответствуют пробы, отобранные из поверхностных водотоков и скважин, приуроченных к днищам местных понижений. Формирование зон меньшей насыщенности вод относительно кальцита обусловлено увеличением здесь интенсивности водообмена.

#### Закключение

На основании интерпретации результатов инженерно-геологических изысканий в районе строительства начального участка магистрального газопровода «Сила Сибири» изучено влияние химического состава подземных вод на развитие карстового процесса.

Представляется необходимым выполнить подобное гидрогеохимическое моделирование по всей трассе магистрального газопровода. Также необходим систематический контроль за химическим составом и гидродинамическим режимом подземных вод с одновременным созданием постоянно действующих компьютерных моделей, описывающих взаимодействие в системе «вода—порода». На основании регулярного проведения подобных исследований может быть дана оценка вероятности развития современных процессов растворения и выщелачивания растворимых горных пород по трассе

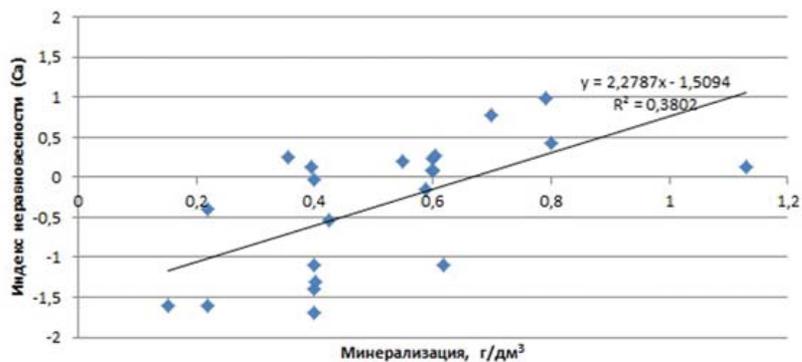


Рис. 2. Зависимость индекса неравновесности по отношению к кальциту и величины минерализации

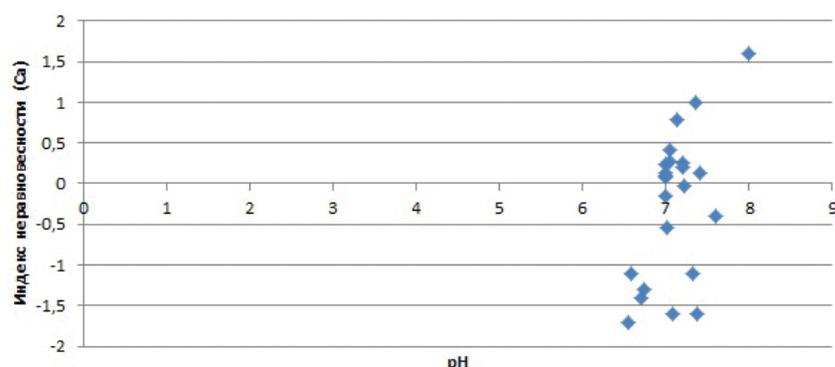


Рис. 3. Зависимость индекса неравновесности по отношению к кальциту и рН

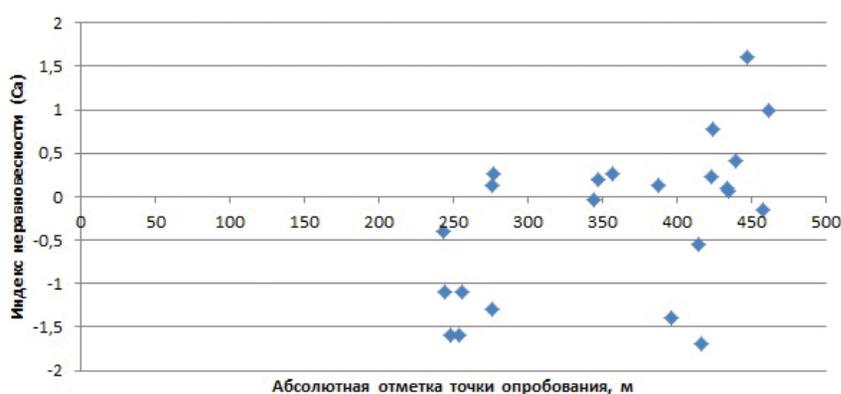


Рис. 4. Зависимость индекса неравновесности и абсолютных отметок точек опробования

газопровода. Рассмотренная методика является перспективной для исследования инженерно-геологических условий при проектировании линейных сооружений в карстовых районах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения в области нефтегазовой гидрогеологии // Разведка и охрана недр. — 1997. — № 2. — С. 37–39.
2. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. — М.: Мир, 1968. — 368 с.
3. Гвоздецкий Н.А. Карст. — М.: Мысль, 1981. — 214 с.
4. Зверев В.П. Роль подземных вод в миграции химических элементов. — М.: Недра, 1982. — 182 с.
5. Максимович Г.А. Основы карстологии. — Пермь, 1963. — Т. I. — 443 с.

6. Строчкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндынское нефтегазоконденсатное месторождение // Изв. Томского политехнического университета. — 2015. — № 4. — Т. 326. — С. 41–55.

7. Толмачев В.В., Ройтер Ф. Инженерное карстоведение. — М.: Недра, 1990. — 151 с.

8. Хоменко В.П. Нормативная оценка карстовой опасности: кризисная ситуация / Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: Матер. Российской конф. с междунар. участием. — Уфа: БашНИИстрой, 2012. — С. 240–245.

9. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. — М.: Недра, 1996. — 423 с.

10. Piper, A.M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses // Eos Trans. AGU, 1944. — Vol. 25(6). — P. 914–928. — doi:10.1029/TR025i006p00914.

11. Waltham T., Bell F., Culshaw M. Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Berlin: Springer, 2005. — 404 p.

© Ермолаева А.В., Строчкова Л.А., 2016

Ермолаева Алена Викторовна // aliona7@inbox.ru  
Строчкова Людмила Александровна // strokova@sibmail.com

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 549.08:553.087

Левченко Е.Н. (ФГУП «ИМГРЭ»), Ожогина Е.Г. (ФГБУ «ВИМС»)

### МИНЕРАЛОГИЯ БАДДЕЛЕИТ-ЦИРКОНИЕВЫХ РУД АЛГАМИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Приведены новые данные по минералогии бадделеит-циркониевых руд Алгаминского месторождения. Выявлены особенности циркона и бадделеита — главных рудных минералов. Показаны возможности технологической переработки руд. **Ключевые слова:** бадделеит, циркон, минеральный состав, руда.*

Levchenko E.N. (IMGRE), Ozhogina E.G. (VIMS)

MINERALOGY OF BADDELEIT-TSIRKON OF ALGAMINSKY ORES OF THE FIELD

*New data on the mineralogy of baddeleyite-tsricon ores of Algaminskogo ore deposit. Features of tsircon and baddeleyite are revealed — the main ore minerals are shown, that result in definite prospect of these ores technological processing. **Key words:** baddeleyite, tsircon, mineral composition, ore.*

Алгаминское месторождение относится к одному из трех известных в мире циркониевых объектов, в рудах которых одновременно присутствуют основные циркониевые минералы — бадделеит и циркон, находящиеся в ассоциации друг с другом [2]. Оно расположено в восточной части Сибирской платформы в зоне ее сочленения с Юдомо-Майским перикратонным прогибом северо-восточней от Ингилийского массива и локализовано в породах юдомской свиты венд-кембрийского возраста, сформированной преимущественно мраморизованными и органогенными доломитами и песчаниками. Рудные тела приурочены к прокарцованным кавернозным доломитам. Выделяются два типа руд: практически массивные коренные руды, формирующие секущие прожилки и штокверковые зоны в горизонтально залегающих секреционных доломитовых мраморах, так называемые «твердые» руды и землистые, порошокватые отложения в карстовых горизонтах мраморов, которые относят к категории «рыхлых» руд [3].

Руды Алгаминского месторождения изучены с различной степенью детальности. Для твердых руд имеется более полная информация о составе, строении, в т.ч. характере взаимоотношений рудных минералов, их реальных составах. Глубокого минералогического изучения рыхлых руд, позволяющего получить о них всестороннюю информацию, практически не проводилось.

Объектом исследования являлись малые технологические пробы (МТП), сформированные терригенно-карбонатными и карбонатными породами, природно дезинтегрированными. Поэтому пробы сформированы преимущественно материалом крупностью менее 2,5 мм (80 %). На долю крупного материала (более 2,5 мм) приходится порядка 20 %.

Текстура пород весьма разнообразна: от порошокватой и землистой до брекчиевидной, массивной, прожилковой, пористой, кавернозной. Структура преимущественно гранобластовая — от крупно— до тонкозернистой, иногда у песчаников отмечаются реликты обломочных структур. В отдельных пробах отмечаются грубообломочные породы различной степени литификации (щебень, дресва, дресвяники, брекчии и пр.). Цемент обломочных пород базальный, контактово-базальный, реже контактово-поровый, сформированный тесно ассоциирующими гидроксидами железа и слоистыми алюмосиликатами. В породах развито вторичное минералообразование в виде гнезд тонко-мелкокристаллического карбоната, агрегатов мелкозернистого кварца.

Результаты ситового анализа показали, что в руде всех проб диоксид циркония концентрируется в материале крупностью менее 2,5 мм (табл. 1). Следовательно, практический интерес представляет именно этот материал. При этом прослеживается четкая тенденция к накоплению полезного компонента в материале крупностью менее 0,05 мм, по существу представляющим собой предварительно обогащенный продукт исходной руды (шламовый концентрат), выход которого составляет 4,03–17,1 % при распределении  $ZrO_2$  от 12,17 до 43,62 %.

Особенности распределения диоксида циркония, представленного собственными минеральными фазами, присутствующими в основном в тонкодисперсном материале руды, определили комплекс минералогиче-