

4. Способ окисления H_2S в серу: пат. 2142403 Рос. Федерация: МПК С 01 В 17/04; В 01 D 53/86 / Ж. Нугерд, А. Филипп, С. Савен-Понсе; заявитель и патентообладатель Элф Эксплорасьон Продюксьон. – № 97112932/12; заявл. 30.10.1996; опубл. 10.12.1999.
5. Способ почти полного удаления соединений серы H_2S , SO_2 , COS и/или CS_2 из исходящего газа серной установки с извлечением этих соединений в виде серы: пат. 2142404 Рос. Федерация: МПК С 01 В 17/04; В 01 D 53/86 / Ж. Нугерд, А. Филипп, С. Савен-Понсе; заявитель и патентообладатель Элф Эксплорасьон Продюксьон. – №97112935/12; заявл. 30.10.1996; опубл. 10.12.1999.
6. Способ удаления соединений серы из воды (варианты) и способ обработки серосодержащего дымового газа: пат. 2108982 Рос. Федерация: МПК С 02 F 3/28 /С.Я.Н. Бейсман; заявитель и патентообладатель Паквес Б.В. – №94046118/25; заявл. 26.05.1993; опубл. 20.04.1998.
7. Крылов О.В. Гетерогенный катализ: учеб. пособие для вузов. – М.: Академкнига, 2004. – 679 с.: ил.
8. Токсарова Ю.С. Влияние сложной природной органической матрицы на целевой анализ углеводов // Горное эхо. – 2021. – № 3 (84). – С. 12-16. – DOI: 10.7242/echo.2021.3.3.
9. Мартихаева Д.Х., Макрыгина В.А., Воронцов А.Е., Развозжаева Э.А. Углеродистое вещество в метаморфических и гидротермальных породах / науч. ред. Б.М. Шмакин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 127 с.: ил.
10. Галимов Э.М., Кодина Л.А. Исследование органического вещества и газов в осадочных толщах дна Мирового океана. – М.: Наука, 1982. – 228 с.: ил.
11. Экологическая химия. Основы и концепции / [Корте Ф., Бахадир М., Клайн В. и др.]; Пер. с нем. В.В. Соболя. – М.: Мир, 1997. – 395 с.: ил.
12. Общая химия. Биофизическая химия. Химия биогенных элементов: Учебник для вузов / [Ю.А. Ершов и др.]. – М.: Высш. шк., 1993. – 560 с.: ил.
13. МР 5174-90. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве: утв. 15.05.1990. – М.: Минздрав, 1990. – 17 с.
14. Бачурин Б.А., Одинцова Т.А. Экоаналитическая идентификация источников органического загрязнения природных геосистем // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 62-65.

УДК 504.4.054:504.064.36

DOI:10.7242/echo.2022.2.5

КИСЛОТНОСТЬ И ЩЕЛОЧНОСТЬ ШАХТНЫХ ВОД КАК КЛЮЧЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ

Н.Ф. Фетисова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В современной практике экологических исследований, связанных с изучением кислых шахтных вод и стоков с породных отвалов, часто наблюдается игнорирование таких показателей их химических свойств, как щелочность и кислотность. Значимость рассматриваемых показателей часто недооценена отечественными экологами, тогда как в мировой научной литературе, связанной с проблемой шахтного дренажа, эти характеристики относятся к ключевым параметрам, влияющим прежде всего на выбор предпочтительной технологии очистки. На основании изучения научных работ, посвященных вопросам щелочности и кислотности шахтного дренажа, дана краткая характеристика этих параметров и наиболее широко известных методов их определения. На примере изливов шахтных вод Кизеловского угольного бассейна выполнен расчет их кислотности, показана практическая значимость этого показателя для планирования мероприятий по очистке кислых стоков.

Ключевые слова: кислые шахтные воды, кислотность, щелочность, мониторинг.

Введение

Кислотный дренаж ликвидированных угольных шахт представляет серьезную экологическую опасность, поскольку приводит к ухудшению качества воды поверхностных водоемов, принимающих стоки, и снижению водного биоразнообразия.

С целью оценки влияния шахтных стоков на качество воды рек и эффективность работы гидротехнических очистных сооружений проводится гидрохимический мониторинг. В отечественной научной и производственной практике при мониторинге шахтных вод, как правило, определяются следующие параметры: величина рН, содержание сульфатов, металлов и специфических соединений, связанных с конкретными горными работами. В зарубежной практике при исследовании химических свойств шахтного дренажа к ключевым показателям, влияющим, прежде всего, на выбор предпочтительной технологии очистки, кроме вышеперечисленных, относятся также *щелочность* и *кислотность*. Согласно руководству по управлению кислым шахтным дренажем [1], наиболее важными параметрами для проб шахтных вод, отобранных при мониторинге, являются следующие: рН, кислотность, щелочность, электропроводность, сульфаты и интересующие металлы.

В литературе, связанной с исследованием шахтных вод, кислотность и щелочность иногда путают с водородным показателем рН. Разница заключается в том, что понятие *щелочность* относится к способности раствора нейтрализовать кислоту, а под *кислотностью* понимается мера способности раствора нейтрализовать добавление щелочного реагента [2-5]. В статье дана краткая характеристика этих параметров и наиболее широко известных методов их определения. На примере изливов шахтных вод Кизеловского угольного бассейна выполнен расчет их кислотности, на основании чего оценен требуемый расход щелочного реагента.

Методы и подходы к оценке щелочности и кислотности

Наиболее известные определения щелочности и кислотности предложены В. Стаммом и Дж. Морганом [6], согласно которым щелочность определяют как «эквивалентную сумму оснований, которые титруются сильной кислотой», а кислотность – как «эквивалентную сумму кислот, которые титруются сильным основанием». Кислотность и щелочность могут быть измерены в различных единицах, таких как мэкв/л (миллиэквивалент на литр), мкэкв/кг (микроэквивалент на килограмм) или мг/л CaCO_3 (мг/л эквивалента CaCO_3).

Зарубежные понятия кислотность и щелочность в России объединены общим параметром «буферная емкость». Буферный раствор представляет собой раствор, к которому можно добавить кислоту или щелочь без существенного изменения его рН. Щелочными компонентами буферного раствора нейтрализуется избыток ионов H^+ , кислотными – избыток гидроксид ионов. Например, если добавить один и тот же раствор слабой кислоты в две пробирки с водой, обе из которых имеют рН = 7, но одна вода без буферной емкости (с нулевой щелочностью), а другая – с буферной емкостью (например, с щелочностью 50 мг/л), то рН воды с нулевой щелочностью сразу упадет, а рН воды, обладающей щелочностью, изменится очень незначительно или не изменится совсем. Буферная емкость – это свойство, которое защищает водоемы от колебаний рН. Основными источниками естественной щелочности в природных водах являются породы, содержащие карбонатные, гидрокарбонатные и гидроксидные соединения [7].

В 1939 г. Международная ассоциация физической океанографии приняла термин «*щелочность*» в качестве стандартного обозначения, определяя его как «количество миллиэквивалентов иона водорода, нейтрализуемого одним литром воды при 20°C» [8]. Щелочность измеряют путем титрования раствора кислотой до тех пор, пока его рН резко не изменится или не достигнет известной конечной точки, в которой это происходит [8]. Стандартные методы определения щелочности, принятые за рубежом [9, 10], предусматривает два случая: 1) если начальный рН анализируемой пробы больше 4,5, то раствор титруется H_2SO_4 до конечной точки рН = 4,5; 2) если начальный рН меньше 4,5, то щелочность принимается равной нулю.

Для карбонатной системы ($\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$) щелочность можно определить на основании выражения [4, 6]:

$$\text{Щелочность} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+], \quad (1)$$

где в квадратных скобках указана концентрация соответствующих ионов (моль/л). В кислых шахтных водах ($\text{pH} > 4,5$) практически за всю щелочность отвечают ионы HCO_3^- [4]. В отличие от методов титрования, расчетным путем можно получить отрицательное значение щелочности в случае, если концентрация $[\text{H}^+]$ больше, чем сумма других членов в уравнении (1) [5]. Отрицательное значение щелочности по сути представляет собой количество основания, необходимого для титрования раствора в закрытой системе до эталонного значения pH или конечной точки (обычно $\text{pH} \approx 4,5$ [4]).

Под *кислотностью* понимается мера, равная количеству основания, необходимого для нейтрализации (кислой) воды [3]. Кислотность шахтного дренажа определяется на основании растворенных в воде ионов при имеющемся уровне pH образца и способности этих веществ подвергаться гидролизу до значений $\text{pH}_{\text{раствора}} \leq 8,3$ [4]. В кислых шахтных водах кислотность включает «минеральную кислотность» (обусловленную наличием Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Al^{3+} и ионов других металлов) и кислотность ионов водорода [3]. Вода, изначально имеющая pH близкую к нейтральному (6-7) и содержащая растворенные металлы, может обладать как щелочностью, так и кислотностью, но после окисления, гидролиза и осаждения Fe, Mn и других металлов она может стать кислой ($\text{pH} < 4,5$) [4]. Стандартные методы измерения кислотности, часто называемые в зарубежной научной литературе как методы «горячей кислотности» [10, 11]), предусматривают добавление H_2SO_4 (если исходная $\text{pH} > 4,5$) и H_2O_2 с последующим кипячением перед титрованием NaOH до конечной точки $\text{pH} = 8,3$. Добавление H_2O_2 вызывает окисление ионов металлов-восстановителей (например, Fe^{2+}), а стадия кипячения способствует выделению CO_2 . Этот метод титрования наиболее подходит для определения характеристик шахтных дренажей и других растворов, содержащих ионы металлов [4].

С практической точки зрения при планировании методов очистки шахтных вод кислотность воды является показателем необходимого объема щелочного реагента, который необходим для нейтрализации как ионов водорода, присутствующих в растворе (pH раствора), так и ионов водорода, образующихся при окислении и/или гидролизе растворимых металлов и их осаждении. Кислотность обычно выражается в эквиваленте CaCO_3 , учитывая, что 50 мг CaCO_3 могут нейтрализовать 1 мг ионов H^+ [2].

Кислотность для кислых шахтных вод может быть оценена расчетным путем с использованием следующего уравнения [12]:

$$\text{Кислотность} = 50 (2\text{Fe}^{2+}/56 + 3\text{Fe}^{3+}/56 + 3\text{Al}^{3+}/27 + 2\text{Mn}^{2+}/55 + 1000(10^{-\text{pH}})) \quad (2),$$

где рассчитанная кислотность выражается в мг/л эквивалента CaCO_3 , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} и Mn^{2+} – концентрации металлов в растворе (мг/л), а 50 – коэффициент для перевода миллиэквивалент (мэкв) кислотности в мг/л CaCO_3 [3]. В работе [4, рис. 8], на основании сопоставления трех больших наборов данных в диапазоне pH от 1,6 до 8,5 и с кислотностью до 15000 мг/л CaCO_3 показано хорошее соответствие между измеренной кислотностью, полученной титрованием, и рассчитанной кислотностью.

В исследовании [5] показано, что для расчета кислотности может быть применено уравнение (3), поскольку Fe^{3+} не будет сильно влиять на кислотность воды в диапазоне

pH от 2,5 до 8,3 из-за низкой растворимости соединений Fe^{3+} и склонности к гидролизу при низком pH.

$$\text{Кислотность} = 50 (10^{3-\text{pH}} + 2\text{Fe}^{2+}/55,8 + 2\text{Mn}^{2+}/54,9 + 3\text{Al}^{3+}/27,0) \quad (3)$$

Ионы некоторых металлов, такие как Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} и Ni^{2+} , могут вносить дополнительный вклад в кислотность за счет образования ионов H^+ при формировании осадка и, следовательно, должны быть учтены при оценке кислотности [2, 3]. Однако отмечается [3], что вклад этих металлов в общую кислотность зависит от их концентрации, конкретного выпадающего в осадок вещества и анионного состава раствора. Если эти металлы не присутствуют в высоких концентрациях (десятки мг/л), то на кислотность они существенно не влияют.

Важное практическое применение имеют производные термины «чистая щелочность» и «чистая кислотность». В общем виде, без указания того, как получены ли входные значения (титрованием или расчетным путем), эти параметры определяются следующим образом [5]:

$$\text{чистая щелочность} = - \text{чистая кислотность} = \text{щелочность} - \text{кислотность} \quad (4)$$

$$\text{чистая кислотность} = \text{кислотность} - \text{щелочность} \quad (5)$$

«Чистая щелочность» и «чистая кислотность» обычно рассчитываются, чтобы определить, требует ли конкретная шахтная вода добавления щелочи [5]. Если сточные воды являются «чисто щелочными», то щелочность превышает кислотность и после полного окисления сточных вод (кислородом воздуха) значение pH остается близким к нейтральному. Для таких вод рекомендуются системы, которые способствуют аэрации сточных вод и задерживанию осажденных твердых частиц. С другой стороны, если сточные воды «чисто кислые», то кислотность превышает щелочность, и после полного окисления и осаждения растворенных металлов pH будет снижаться до кислых значений. Для таких вод рекомендуются системы очистки, в которых вносится щелочной компонент для повышения или поддержания уровня pH. В работе [13] приведена блок-схема для выбора пассивной системы очистки на основе химии воды, объема потока, а также особенностей рельефа. Согласно данной схеме, основными критериями для выбора подходящей системы являются чистая щелочность и чистая кислотность.

Расчет кислотности и результаты

В качестве примера кислотность была рассчитана для нескольких изливов шахтных вод Кизеловского угольного бассейна. Исходными данными для расчета послужили результаты гидрохимического мониторинга [14]. Выбор анализов был продиктован возможностью сравнения результатов расчета кислотности с результатами экспериментов по определению оптимального количества щелочного реагента для нейтрализации кислых шахтных вод, приведенными в работе [15]. Химический состав проб воды, используемой для эксперимента, в указанной работе не приводится, за исключением двух показателей: pH и концентрации $\text{Fe}_{\text{общ}}$. Таким образом, эти два параметра послужили ориентирами при выборе подходящих для расчета кислотности анализов. Следует отметить, что эксперимент по нейтрализации был выполнен для 8 проб, отобранных из различных изливов. В результате поиска подходящих анализов в геоинформационной системе [14] пробы с приблизительно близкими параметрами были выявлены только для трех из-

ливов (табл. 1). В всех остальных случаях концентрации железа, согласно данным мониторинга, значительно ниже, чем в пробах, использованных для эксперимента.

Таблица 1

Кислые воды изливов, использованные в эксперименте по нейтрализации, и результаты эксперимента (по данным [15])

Излив из горной выработки	pH	Fe _{общ} , мг/дм ³	Оптимальный расход щелочного реагента (г/л), (эксперимент)
Штольня шахты им. Калинина	2,99	3800,0	8,75
Шурф 2 - бис шахты Коспашская	3,43	3702,9	10,0
Шурф 56-62 шахты им. 40 лет Октября	3.11	475,5	1,25

Значение pH во всех рассмотренных пробах менее 4.5, соответственно, щелочность отсутствует, а кислотность соответствует «чистой кислотности». Для расчета кислотности по формуле (2) необходимо знать концентрации ионов Fe²⁺ и Fe³⁺. Ввиду отсутствия их аналитически измеренных концентраций, распределение ионов Fe²⁺ и Fe³⁺ было смоделировано с использованием компьютерной программы PHREEQC [16]. Температура шахтных вод задавалась равной 7°C. Значение окислительно-восстановительного потенциала (Eh) определялось с учетом имеющихся концентраций ионов NH₄⁺ и NO₃⁻. Баланс заряда корректировался по концентрации сульфатов. Результаты расчета кислотности показаны в таблице 2.

Таблица 2

Расчет кислотности шахтных вод и приблизительного расхода щелочного реагента, состоящего на 90 % из CaCO₃

Излив из горной выработки	pH	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Al ³⁺	Кислотность, г/л CaCO ₃	Расход реагента 90% CaCO ₃ , г/л
Штольня ш. им. Калинина	3,0	1280	2211	34,76	94,42	8,84	9,83
Шурф 2-бис ш. Коспашская	3,5	1889	1856	49,94	97,86	8,99	9,99
Шурф 56-62 ш. им. 40 лет Октября	3,3	290	129	4,56	1,09	0,90	1,00

По данным [17], щелочной реагент (отход содового производства) более чем на 90% состоит из тонкодисперсного карбоната кальция. На основании расчета кислотности выполнена оценка приблизительного количества щелочного реагента, условно состоящего на 90% из CaCO₃, необходимого для нейтрализации кислых шахтных вод (табл. 2).

Наиболее точное совпадение по расходу реагента, определенному на основании рассчитанной кислотности и эксперимента, наблюдается для излива шахты Коспашская (9,9 и 10, соответственно). В данном случае значения параметров (pH и Fe_{общ}) в пробе, с которой проводился эксперимент [15], и в анализе, используемом для расчета кислот-

ности, наиболее близки. В целом, расход щелочного компонента, состоящего на 90% из CaCO₃, рассчитанный на основании кислотности, сопоставим с экспериментальными данными.

Расчет, выполненный по формуле (3), приравнивая содержание Fe_{общ} к содержанию Fe²⁺, показал, что в таком случае кислотность рассмотренных шахтных вод будет на 12-22% меньше, чем кислотность, рассчитанная по формуле (2).

Выводы

Варианты очистки шахтных вод подбираются в зависимости от объема шахтных вод, их щелочности и кислотности, а также имеющихся ресурсов для строительства и обслуживания систем очистки [3,12,13]. В отсутствие экспериментальных данных по определению необходимого количества щелочного реагента (или щелочного материала) предварительная оценка его требуемого объема в масштабах всего бассейна может быть рассчитана на основании данных мониторинга. Поскольку химический состав шахтных вод динамичен во времени, лабораторные эксперименты, выполненные однократно, могут в перспективе «недооценить» или «переоценить» расход реагента, что в конечном итоге приведет либо к недостаточно эффективной очистке воды, либо к дополнительным экономическим издержкам. Оценка кислотности и/или щелочности шахтных вод (измеренная или расчетная) при проведении мониторинга способствует своевременному выявлению изменений их химических свойств и внесению соответствующих коррективов на стадии проектирования или эксплуатации систем очистки.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000402-4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. GARD/INAP. The global acid rock drainage guide: The international network for acid prevention: сайт. – Текст электронный. – URL: http://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page. (Дата обращения 20.05.2022).
2. Zipper C., Skousen J., Jage C. Passive treatment of acid-mine drainage // Powell River Project: Virginia cooperative extension: official website. – Текст электронный. – URL: <https://www.pubs.ext.vt.edu/460/460-133/460-133.html>. (Дата обращения 20.05.2022).
3. Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage / Skousen, J.G. [et al]; National Mine Land Reclamation Center. – Morgantown, WV, 1998. – 131 p.
4. Kirby C.S., Cravotta C.A. Net alkalinity and net acidity 1: theoretical considerations // Applied Geochemistry. – 2005. – Vol. 20, № 10. – P. 1920-1940. – DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.07.002.
5. Kirby C.S., Cravotta C.A. Net alkalinity and net acidity 2: practical considerations // Applied Geochemistry. – 2005. – Vol. 20. – P. 1941-1964. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.07.003.
6. Stumm W., Morgan J.J. Aquatic Chemistry. – Third Edition. – New York, Wiley. – 1996. – 780 p.
7. The role of alkalinity in citizen monitoring. What is alkalinity? // Water Research Center: сайт. – Текст электронный. – URL: <https://www.water-research.net/index.php/the-role-of-alkalinity-citizen-monitoring> (Дата обращения 20.05.2022).
8. Dickson A.G. The development of the alkalinity concept in marine chemistry // Marine Chemistry. – 1992. – V. 40, № 1-2. – P. 49-63. – DOI: 10.1016/0304-4203(92)90047-E.
9. APHA. Alkalinity (2320). Titration method // Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. – 20th Edition. – Washington, 1998. – P. 2.26-2.29.
10. ASTM D1067-92 Standard test methods for acidity or alkalinity of water // Annual Book of ASTM Standards, Water and Environmental Technology. – West Conshohocken, PA. – Sect. 11.01.2000. – P. 65-71.
11. APHA. Acidity (2310). Titration method // Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. – 20th Edition. – Washington, 1998. – P. 2.24-2.26.
12. Hedin R.S., Nairn R.W., Kleinmann R.L.P. Passive treatment of coal mine drainage / US Bureau of Mines IC 9389, US Department of the Interior. – Washington, DC., 1994. – 44 p.

13. Skousen J., Zipper C.E., Rose A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R., McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment // *Mine Water and the Environment*. – 2017. – V. 36., № 1. – P. 133-153. – DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.
14. Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна: офиц. сайт. – Текст электронный. – URL: <http://kub.maps.psu.ru/> (Дата обращения 20.05.2022).
15. Выполнение научно-исследовательской работы по минимизации и ликвидации воздействия кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна на водные объекты Пермского края: отчет о НИР. Кн. 1.1 / рук. Максимович Н.Г.; Естественнонаучный институт ПГНИУ. – Пермь, 2019. – 203 с.
16. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations // *Techniques and Methods*. – U.S. Geological Survey, 2013. – Book 6 chap. A43. – 497 p.
17. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения / ПГНИУ. – Пермь, 2018. – 287 с.: ил.

УДК 551.14

DOI:10.7242/echo.2022.2.6

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА ТЮБЕГАТАНСКОЙ АНТИКЛИНАЛИ

И.И. Чайковский

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Проведено структурное дешифрирование цифровой модели рельефа района Тюбегатанской антиклинали, совмещенного с геологической картой масштаба 1:50 000. Показано наличие трех систем нарушений. Первая представлена крупными правыми сдвигами северо-западного простирания, секущими под углом Тюбегатанскую антиклиналь, и связывается с развитием Таласо-Ферганского разлома. Большинство из них проходят вдоль антиклинальных осей северо-западной ориентировки, усложняют ее *s*-образными перегибами и нагнетанием соляных масс в сводовые структуры. Увеличение мощности гаурдакской эвапоритовой толщи достигает здесь почти 30%. К ней примыкает система серповидных в плане нарушений (сбросы и надвиги) сколово-отрывной природы (*flower-structure*). Вдоль оси Тюбегатанской антиклинали развиты нарушения, сопоставимые с разрывами отрывной природы. Все выявленные структуры благоприятны для инфильтрации поверхностных вод в соляную толщу.

Ключевые слова: Тюбегатанское месторождение калийных солей, линеаментный анализ, разрывные нарушения, соляная тектоника, проницаемые структуры.

Выявление разломной структуры региона не только позволяет реконструировать характер проявления тектонических деформаций, но является одним из важных условий обеспечения безопасной разработки месторождений калийных солей. Разрывные нарушения могут выступать в виде структур, благоприятных для поступления поверхностных вод к кровле соляной толщи и проявления различных гипергенных процессов, в том числе техногенных катастроф [2, 4].

Для выявления тектонической структуры Тюбегатанской антиклинали и локализованного в ее северо-западном крыле одноименного месторождения калийных солей использована цифровая модель рельефа SRTM (NASA Shuttle Radar Topography Mission), совмещенная с геологической картой масштаба 1:50 000, составленной Ф.М. Фаттаховым, В.К. Панасюченко и др. (1963).

Сама Тюбегатанская антиклиналь северо-восточного простирания характеризуется «*g*»-образными перегибами оси за счет осложнения осями антиклинальных складок меньшего порядка северо-западной ориентировки. Северо-западное крыло Тюбегатанской антиклинали полого (менее 10°) погружается на северо-запад, а восточное – более крутое (до 40°).