

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ**

**С.Л. Шварцев, профессор**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия*



**Профессор  
С.Л. Шварцев**

КРАТКАЯ СПРАВКА

*Шварцев Степан Львович - доктор геолого-минералогических наук, профессор, Лауреат Государственной премии СССР; Лауреат Премии РАН им. академика Ф.П. Саваренского; «Заслуженный геолог РФ» и «Заслуженный деятель науки РФ» (2002 г.). Награжден орденами «Знак Почёта», «Дружбы», Почётной Ленинской грамотой Президиума Верховного Совета СССР, золотой и бронзовой медалями ВДНХ, нагрудными знаками Минобразования СССР «За отличные успехи в работе» (1984г.), Советом энциклопедии «Лучшие люди» орденом «Почет и слава» (2011 г.), медалью «За развитие недропользования Томской области» (2016 г.), золотой медалью ТПУ. Международный биографический центр (Кембридж, Англия) дважды включал С.Л. Шварцева в номинацию «Учёный года» (2004 и 2007гг.), Международный учёный года (2006г.), в 2005г. избрал его в число 2000 выдающихся учёных XXI века. В 2007г. отмечен «Научной премией мира». Американский биографический институт наградил «Памятной медалью «Ученый 2008 года», Европейский научный и индустриальный консорциум – орденом “Labore et Scientia –трудоm и знанием» (2013 г.).*

*Два Китайских университета (Нанчанский и Восточно-Китайский) избрали С.Л. Шварцева Почетным профессором своих университетов в 2010 г. и 2013 г. соответственно. Научный руководитель Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии. Директор Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (1997-2013 гг.). Руководителем Сибирской гидрогеохимической школы. Подготовил 50 кандидатов и 9 докторов наук. С. Л. Шварцев - широко известный в России и в мире ученый, специалист в области гидрогеологии, гидрогеохимии и геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых. Он впервые в мировой практике разработал теорию и практику применения гидрогеохимического метода поисков месторождений рудных полезных ископаемых в условиях криолитозоны, создал новое научное направление в области взаимодействия воды с горными породами, развил современную концепцию формирования состава подземных вод. Им выполнены разные теоретические разработки по проблемам круговорота воды в земной коре, ее синтезу и химическому разложению, геохимическому циклу в земной коре, формированию крепких рассолов и состава подземных вод. Им опубликовано 417 работ, в том числе 16 монографий и 2 учебника, 90 работ переведены на английский язык и изданы за рубежом, в том числе 2 монографии изданы в Англии и Германии.*

В последние годы в России очень активно стали звучать проблемы Арктики в связи с необходимостью ее более активного освоения в ближайшие годы. Но Арктика – это мир, прежде всего мерзлых пород и льдов, т.е. это постоянно охлажденная область нашей планеты, которая «характеризуется определенной формой проявления двух химических тел, играющих на нашей планете совершенно исключительную по значению роль - воды и углекислоты» [1, с.637]. В этой области значительная часть воды находится в твердом состоянии, а угольная кислота встречается в жидком. Все это накладывает огромный отпечаток на геохимическое состояние и миграцию химических элементов, включая непосредственно и мерзлые породы.

Долгое время считалось, что мерзлота практически законсервировала развитие каких бы то ни было геохимических процессов, создав своеобразный химический покой, который нарушается только физическими явлениями, связанными с процессами промерзания и оттаивания (это выражается в формировании своеобразных форм рельефа типа бугров пучения, гидролакколитов, термокарстовых воронок и т. д.). Отсутствие химических и биологических процессов якобы подтверждалось и находками в мерзлых слоях хорошо сохранившихся органических остатков, включая огромные туши мамонтов.

И все же, начиная с середины XXв., удалось преодолеть такие взгляды. Оказалось, что мерзлые слои земные живут своеобразной химической жизнью, которая только начинает приоткрывать свои тайны. Связано это с тем, что в горных породах замерзает не вся вода, а только так называемая свободная, которая не испытывает на себе влияние горных пород и находится в достаточно крупных порах. Чем меньше размер пор, тем ниже температура замерзания такой воды и в мерзлых породах она находится в своем обычном, т.е. не замершем состоянии. Кроме того, не замерзает и высокоминерализованная вода (рассол), поскольку температура замерзания такой воды ниже, чем температура мерзлых пород. Имеются и другие причины, которые обеспечивают незамерзание воды и в мерзлых породах [2].

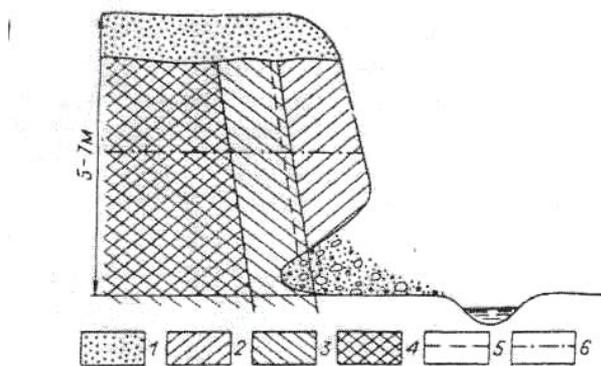
Наличие жидкой воды в мерзлых породах – это главное обстоятельство, которое определяет возможность протекания разнообразных геохимических процессов и при отрицательных температурах. Важно также, что эта незамерзшая вода находится в постоянном движении. Механизм этого явления по И.А. Тютюнову состоит в следующем: «Движущей силой миграции воды и ее кристаллизации является разность поляризационных (химических) потенциалов взаимодействующих фаз грунтовой системы» [3, с.88]. В свою очередь, разность химических потенциалов определяется температурным градиентом, влажностью, дисперсностью и минералогическим составом грунтовой системы. Естественно, что скорости движения таких физически связанных вод исключительно малы, что и определяет наличие в мерзлых породах очень слабого водообмена, который и контролирует специфику всех геохимических или криогенных процессов, протекающих в этих условиях. Оказалось, что в мерзлых породах скорости химических реакций, протекающих при взаимодействии воды с горными породами выше, чем скорости движения таких вод. Поэтому в мерзлых породах происходит накопление высоких содержаний многих химических элементов и образование ими многих легкорастворимых минералов, если этому благоприятствуют геологические условия.

Еще в 1941 г. позже академик С.С. Смирнов, изучая зону окисления Эге - Хайского месторождения (Якутия), обосновал точку зрения, что наличие большого количества легкорастворимых сульфатных минералов в исследуемом месторождении является следствием весьма затрудненного водообмена, обусловленного наличием многолетней мерзлоты. Позже и другие исследователи пришли к аналогичным выводам, например, в работе [4].

В 60-е годы прошлого века нами совместно с Б.В. Олейниковым проводилось изучение зон окисления на ряде сульфидных рудопроявлений северо-запада Сибирской платформы. Исследования проводились в бассейнах рек Северной, Курейки, Горбиячин, Кулюмбэ, Фокиной и др. Зоны рудной минерализации здесь располагаются в экзоконтактовых ореолах трапповых интрузивов, внедренных либо в верхнепалеозойские угленосные отложения, либо в эффузивно - туфогенные образования триаса. Зона окисления на участках развития сульфидов, как правило, имеет небольшую мощность (первые метры) и представлена гидроокислами и окислами железа, скоплениями сульфатов кальция, магния, железа, натрия, алюминия, редкими налетами карбонатов меди. В небольшом количестве в нижней части зон окисления иногда фиксируются агрегаты мельниковита. Остатки первичных сульфидов наблюдаются по всему разрезу таких зон. Среди вторичных минералов широко развиты в них гипс, мелантерит и продукты его дегидратации,

галотрихит, магнистый рёмерит, копиапит, эпсомит, алуноген, натровые квасцы и др. минералы, например, малахит и азурит [5].

Важно подчеркнуть, что сульфаты обнаружены в основном в постоянно мерзлых породах, а не в зоне деятельного слоя. Например, в зоне окисления халькопирит-пирротин-пиритовой жилы берегового обрыва нижнего течения ручья Серебряного (среднее течение р. Фокиной) на дневной поверхности и в полосе деятельного слоя развиты гетит, гидрогетит, лимонит, гипс и малахит (рис.1). На границе деятельного слоя и многолетнемерзлых пород в пределах последних наблюдается магнистый рёмерит с реликтами первичных сульфидов. Более глубокие горизонты зоны окисления сложены мелантеритом с небольшим количеством галотрихита в ассоциации с неокисленными сульфидами и льдом. Заметим, что в нижней части зоны окисления, где развит мелантерит, не установлено даже малейших признаков пленок окисного железа. Следовательно, весьма затрудненный водообмен и отсутствие  $O_2$  в толще мерзлых пород предохраняет двухвалентное железо от окисления и последующего выпадения в виде гидроокиси.



**Рис.1. Схематический разрез по сульфидной жиле на ручье Серебряном.**

1 —рыхлые отложения; 2-зона развития окислов и гидроокислов железа и карбонатов меди; 3 - зона сульфатных минералов с реликтами сульфидов; 4 — первичные сульфиды; 5 — граница многолетнемерзлых пород; 6—уровень паводковых вод.

Наиболее мощная зона окисления развита на медно-никелевом месторождении Норильск-I, возраст которой считается древним, но многочисленные сульфатные минералы — следствие молодых процессов криогенеза [6]. Первичные рудные минералы на месторождении Норильск I представлены пирротинном, пентландитом, халькопиритом, кубанитом и меньше другими сульфидами. Зона окисления, мощностью до 30 м в основном сложена различными гидроокислами железа с большим количеством сульфатных минералов, среди которых Н. С. Зонтовым описаны мелантерит, пизанит, халькантит, моренозит, фибро-феррит, ярозит, гипс и др.

В этой зоне окисления нами обнаружен новый минерал-никельгексагидрит (сульфат Ni). Описываемый минерал был обнаружен в карьере рудника «Северный» в 1959 г. Корки и налеты сульфата покрывали невыветрелые габбро-долериты на дне карьера, где авторы наблюдали, как сульфат кристаллизовался из рудничных вод при испарении последних в летнее время. В последующие годы этот же минерал был установлен в верхних горизонтах зоны окисления, вскрытой карьером в его восточной части. Здесь на вертикальной стенке выработки, обращенной на юг, никельгексагидрит образует корки максимальной толщиной до 1.0 см и многочисленные налеты землистых масс, развившиеся на сильно трещиноватых габбро-долеритах, содержащих окисленные сульфиды. Замечено, что после продолжительных дождей его скопления либо резко уменьшались в размерах, либо

исчезали полностью и появлялись только следующей весной. В отмеченных случаях других сульфатов в ассоциации с никельгексагидритом встречено не было [7].

Результаты наших и многих других ученых позволила более глубоко изучить механизмы формирования сульфатных и др. минералов. Оказалось, что полученные материалы позволяют рассмотреть вопрос о причинах большого количества сульфатных минералов в пределах зон окислений сульфидных месторождений северных районов. В настоящее время в процессе промерзания горных пород и почв происходит подтягивание влаги из нижних горизонтов в зону охлаждения. Это движение влаги имеет место также в толще мерзлых пород в сторону более низких температур. А так как в течение долгих полярных зим верхние горизонты почв и горных пород охлаждаются намного быстрее, чем нижние, миграция влаги происходит из нижних горизонтов в верхние. Вода переносит в растворенном виде различные химические элементы. Последние передвигаются также и в результате диффузии. В верхних частях зон окислений сульфидных месторождений подземные воды имеют низкие величины  $pH$ , высокие концентрации сульфат-иона и различных тяжелых металлов [8]. Около поверхности, где температура горных пород быстро падает, количество незамерзшей воды резко сокращается, что ведет к образованию различных минералов. При этом выпадение сульфатов из раствора может происходить и ниже деятельного слоя. Об этом свидетельствует нахождение мелантерита, галотрихита и магнистого рёмерита в толще мерзлых пород. Дефицит кислорода и замедленный водообмен в этих условиях способствуют сохранению названных минералов. Приведенные факты позволяют сделать вывод, что сульфатообразование в настоящее время происходит как в деятельном слое, так и толще мерзлых пород.

В силу весьма затрудненного водообмена в этих условиях в пределах небольших глубин зоны окисления физико-химическая и термодинамическая обстановка может существенно отличаться даже на небольших участках, что находит отражение в образовании разнообразных вторичных минералов. При низких значениях  $Eh$  и малых величинах  $pH$  образуются мелантерит, галотрихит и другие сульфаты, содержащие двухвалентное железо. На участках где значения вод несколько выше создаются благоприятные условия для частичного окисления железа и возникают копиапит, магнистый рёмерит и другие сульфаты закисного и окисного железа. При высоких значениях  $Eh$  и нейтральной или слабощелочной среде железо полностью выпадает в виде окислов и гидроокислов, а сульфаты представлены гипсом, алуногеном, эпсомитом, квасцами и т.д.

Таким образом, проведенные исследования разными учеными позволили установить, что не только в сезонно-талом слое, но и во всем объеме мерзлоты осуществляется масштабное перераспределение вещества, приводящее к изменениям химического и минерального состава пород, руд, почв и т.д. Криогенная миграция химических элементов обеспечивается широким спектром физико-механических и физико-химических процессов, прямо или косвенно регламентируемых наличием и историей существования мерзлотного режима. Поскольку условия в мерзлых породах различны, мы имеем и разные результаты криогенеза. Поэтому известный гидрогеолог Л. Ф. Швецов предложил выделять площади проявления таких процессов под названием **криогенных геохимических полей**. Совокупность их в свою очередь образует криогенную систему, а сумма протекающих в ней процессов - криогенез. Влияние факторов криогенеза сказывается на развитии всех этапов литогенеза в северных районах [9].

Криогенные геохимические поля формируются в криогенных зонах выветривания горных пород, почвах, заболоченных территориях, зонах окисления. В результате формируются криогенные ореолы рассеивания не только в пределах рудных полей, но и их погребенных разностях [10]. Все это позволило нам говорить об открытии нового явления – криогенного солевого рассеивания химических элементов, которое в корне меняет наше представление о мерзлых породах [11, 12].

К сожалению, наступившие 1990 е годы и связанный с ними развал науки, привели к резкому сокращению объема научных исследований и, в частности, сокращению этого научного направления. Но исследования физически – связанных вод обязательно в районах с развитием мерзлоты продолжались. И в этом направлении достигнуты грандиозные результаты. Сошлемся хотя бы на работу Ю.П. Рассадкина [13], который показал, что вода в малых объемах порового пространства обладает особыми свойствами. К ним относятся: существенное уменьшение диэлектрической проницаемости до величин 4,5; в ней не растворяются соли и не гидратируются ионы; на 35-40% увеличивается вязкость; возрастает коэффициент самодиффузии до величин  $2,3 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ; температура замерзания снижается вплоть до  $-70^\circ\text{C}$ ; увеличивается плотность до  $1,2-1,4 \text{ г/см}^3$ , растет теплопроводность и т.д. Толщина слоя, где проявляются эти изменения, достигает сотен и тысяч ангстрем.

Еще одно важное обстоятельство установлено в последнее десятилетие. Речь идет о том, что система вода-алюмосиликаты является равновесно – неравновесной во всех без исключения участках земной коры: водный раствор всегда неравновесен с отдельными минералами магматического или метаморфического генезиса, но одновременно равновесен с определенной гаммой вторичных минеральных образований. Следовательно, мы имеем дело с внутренне противоречивой системой, способной к самопроизвольному, непрерывному, геологически длительному развитию с образованием принципиально новых минеральных фаз и геохимических типов воды [14].

Еще более важно, что со многими ведущими минералами эндогенного генезиса равновесие воды в принципе невозможно. Удивительно и то, что в эту группу входят только минералы, слагающие базальты, изначально образовавшие нашу планету. Причина такого явления состоит в том, что поступающие из базальтов в раствор химические элементы связываются новыми минеральными соединениями, формирующимися в этой системе. Такие вторичные минералы выступают геохимическими барьерами на пути установления равновесия подземных вод с растворимыми минералами, что обеспечивает непрерывность растворения базальтов, смену во времени состава вторичных минералов и воды [15].

Рассматриваемая нами система никогда не приходит в равновесие и не становится инертной, она, медленно развиваясь, формирует принципиально новые разнообразные минеральные соединения и непрерывно меняет состав воды. Для её развития характерна непрерывность, неравновесность и нелинейность, способность к созданию новых более сложных соединений, которых ранее на земле не было, что является важнейшим признаком эволюции, независимой от внешних факторов и обладающей автономностью, наличием механизмов самоорганизации и т.д. [16].

Это полностью меняет наше представление об эволюции системы вода-порода и позволяет с новых позиций подойти к проблеме солевого рассеивания элементов, включая и многолетнюю мерзлоту. Все это поможет решению многих проблем на территории Арктики.

Литература

1. Вернадский В.И. Избранные сочинения, Т. IV, кн.2, М.:Наука, 1960, 652 с.
2. Алексеев С. В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Изд.»ГЕО», 2009, 319 с.
3. Тютюнов И. А. Введение в теорию формирования мерзлых пород М.: Из-во АН СССР, 1960, 144с.
4. Мирошников Л. Д., Щеглова С. О. О концентрации водорастворимых сульфатов на полуострове Челюскина. Зап. Всес. мннерал. об-ва. ч. 88, вып. 6, 1959, С.101-114
5. Олейников Б. В., Шварцев С.Л. Современное сульфатообразование в зонах окисления пирротин-халькопиритовых гидротермальных рудопроявлений (северо-запад Сибирской платформы) //Геология и геофизика, 1968, №6, С.15-24
6. Зонтов Н.С. О зоне окисления вюрмского времени в Норильском месторождении медно-никелевых сульфидных руд. //ДАН СССР, 1959, т.129, №2, С.181-184
7. Олейников Б.В., Шварцев С.Л., Мандрикова Н.Т., Олейникова Н.Н. Никельгексагидрит – новый минерал. Записки Всесоюзного минералогического об-ва, 1965, вып.5, С.534-547
8. Шварцев С.Л. О гидрогеохимическом методе поисков в северных заболоченных районах //Геология и геофизика. 1965, №7, С.3-10.
9. Швецов П.Ф. Криогенные геохимические поля на территории многолетней криолитозоны //Изв. АН СССР, сер. геол., №1, 1961, С.73-81
10. Питулько В.М., Шварцев С.Л. Геохимические методы поисков рудных месторождений в областях криогенеза // Сов. геология, 1977, №3, С.94-107
11. Шварцев С.Л. Геохимическая деятельность мерзлоты. //Природа, 1975, №7, С. 67-73.
12. Мельников П.И., Иванов О.П., Макаров В.Н., Питулько В.М., Шварцев С.Л. Явление криогенной миграции химических элементов и его значение для поисков месторождений в районах многолетней мерзлоты //ДАН СССР, 1988, т.303, №4, С.963-967
13. Рассадкин Ю.П. Вода обыкновенная и необыкновенная. // М.: «Галерея СТО», 2008. 840 с.
14. Шварцев С.Л. Внутренняя эволюция геологической системы вода-порода. //Вестник РАН, 2012, №3, С.242-251
15. Шварцев С.Л. Основное противоречие, определившее механизмы и направленность глобальной эволюции // Вестник РАН, 2015, том 85, № 7, с. 632–642.
16. Шварцев С.Л. С чего началась глобальная эволюция? //Вестник РАН, 2010, №3. С.235-244.

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ НЕФТЯНОЙ ОТРАСЛИ  
В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ**

**А.А. Вазим, доцент, А.В.Шарапов**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия*

В настоящее время нефтяная промышленность является локомотивом развития российской экономики, обеспечивая развитие науки, образования,