

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.343

**ВЛИЯНИЕ КРИОГЕНЕЗА НА СТОК РАСТВОРЕННОГО ВЕЩЕСТВА РЕКАМИ  
В КРИОЛИТОЗОНЕ**

**В.Н. Конищев, В.В. Рогов**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,  
119992, Москва, Воробьевы горы, Россия, cryolab@geogr.msu.ru*

Современные данные по стоку растворимых веществ реками показывают, что в области распространения вечной мерзлоты его величина достаточно велика, несмотря на значительное ослабление химического выветривания. Из представленных материалов следует, что вероятной причиной этого может быть криогенное выветривание минералов. Рассчитаны потери растворенного вещества различными типами горных пород и минералов в результате воздействия циклов промерзания–оттаивания.

*Криогенез, криолитозона, минералы, температура, газово-жидкие включения*

**INFLUENCE OF CRYOGENESIS ON THE DISSOLVED MATTER DRAIN  
BY RIVERS IN CRYOLITHOZONE**

**V.N. Konischev, V.V. Rogov**

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,  
119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, cryolab@geogr.msu.ru*

The modern data on the soluble matter drain by rivers have shown that in the field of permafrost distribution its size is great enough, despite the significant weakening of chemical airing. Our studies have demonstrated that the cryogenic weathering of minerals may be a probable reason of it. Losses of the dissolved matter by various types of rocks and minerals as a result of influence of freezing-thawing cycles have been estimated.

*Cryogenesis, cryolithozone, minerals, temperature, gas-liquid inclusions*

**ВВЕДЕНИЕ**

Для оценки соотношения физического и химического выветривания широко применяются суммарные величины выносимых реками растворенных веществ и обломочного материала. При сопоставлении годовых величин твердого стока и стока растворенных веществ в реках, дренирующих различные регионы криолитозоны северной Евразии, обнаружена определенная специфика этих территорий [Макаров, 1985; Конищев, 1991]. Кроме того, показано, что даже в горных районах криолитозоны годовые величины стока растворенных веществ в несколько раз превышают величины твердого стока, так же как и на равнинных реках гумидных областей (табл. 1, рис. 1). При этом авторы приведенных данных не подвергают сомнению тезис, что сток растворенных веществ отражает напряженность химического выветривания на водосборах. Противоречивость выявленной специфики заключается также в том, что в холодных гу-

мидных областях криолитозоны ортоэлювиальная кора выветривания формируется процессами преимущественно физического и в существенно меньшей степени химико-минералогического изменения исходных массивно-кристаллических пород. Следствием этого является общая, быстро нарастающая к низу разреза обломочность и слабая оглиненность толщи коры выветривания. Маломощность и обломочность ортоэлювиальной коры выветривания в криолитозоне – отличительная черта ее зрелого зонального профиля, которая обусловлена климатическими условиями прежде всего территорий, сложенных силикатными массивно-кристаллическими горными породами [Таргульян, 1971; Конищев, 1981]. В то же время из табл. 1 следует, что соотношение растворенного и терригенного материалов непосредственно зависит от химико-минерального состава основных геологических формаций, слагающих бассейны рек.

Характеристика стока рек Якутии

Таблица 1.

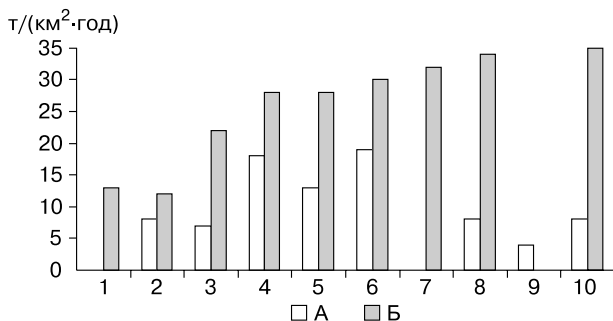
Номер станции	Бассейн реки (створ)	Площадь водосбора (тыс. км <sup>2</sup> )	Модуль стока (л/с · км <sup>2</sup> )	Сток терригенного материала (М <sub>т</sub> , т/(км <sup>2</sup> · год))	Сток растворенного материала (Р <sub>р</sub> , т/(км <sup>2</sup> · год))	Минерализация (мг/л)	Р <sub>н</sub> /М <sub>т</sub>	Геологическая формация	Характер распространения	Мощность вечномерзлых пород (м)
149	Олекма (Куду-Кель)	115,0	8,7	2,4	9,8	36	4,1	Карбонатная	Прерывистый	200
159	Чара (Токко)	62,5	10,0	8,8	15,7	50	1,8	Гранитоидная	То же	200
195	Алдан (Томмон)	49,5	10,4	9,9	19,7	60	2,0	То же	»	200
215	Тимптон (Нагорный)	0,6	15,4	2,0	9,7	20	4,8	Карбонатно-терригенная	Сплошной	200
227	Учур (Чальбю)	108,0	11,3	4,7	12,5	35	2,6	Терригенно-карбонатная	Прерывистый	200
157	Чара (Чара)	4,15	12,4	23,1	29,3	75	1,3	Гранитоидная	То же	100–200
186	Ботом (Бролог)	12,2	3,35	3,2	34,0	301	10,6	Карбонатная	»	100–200
219	Чульман (Чульман)	3,84	12,8	5,0	16,1	40	3,2	Гранитоидная	Прерывистый	200
422	Нера (Ала-Чубук)	22,3	5,3	25,5	7,6	45	0,29	Терригенная	Сплошной	200–400
б/н	Кольма (Среднеколымск)	361,0	6,26	19,4	10,1	52	0,52	То же	То же	200–300
316	Яна (Джангмы)	217,0	4,27	13,6	4,4	30	0,3	»	»	200–300
347	Индигирка (Воронцово)	305,0	5,05	36,6	5,4	34	0,16	Карбонатная	»	200–400
328	Адыча (Ойун-Хомогово)	65,0	5,1	36,9	8,0	50	0,22	Терригенная	»	200–400
260	Вилюй (Сунгар)	214,0	3,86	1,5	12,2	101	8,2	Карбонатная	»	200–400
43	Лена (Табага)	897,0	8,0	14,0	36,4	161	2,6	То же	Прерывистый	200

Примечание. Таблица составлена по материалам Гидрометслужбы СССР [Основные..., 1967, 1975; Макаров, 1985].

Соотношение растворенного и твердого стоков колеблется от 0,3 в области распространения терригенных формаций до 8–10 в карбонатных формациях (см. табл. 1). По-видимому, темпы химической денудации карбонатных толщ в условиях холодного климата вообще характеризуются максимальными значениями. Так, по результатам гидрохимических наблюдений в западной части Шпицбергена, где климатические и геокриологические условия существенно более суровые, чем на территории азиатской криолитозоны, средняя скорость денудации известковых доломитов за последние 10 тыс. лет составляла до 16 мм/1000 лет, оставаясь более высокой по сравнению с силикатными породами [Akerman, 1983]. Современные карстовые формы развиты здесь на пологих склонах, где формируется достаточно мощный снежный покров и талые воды стекают по поверхности в течение значительной части летнего сезона. Хорошо известно, что растворимость карбонатов с понижением температуры воды растет. Поэтому даже за короткий период арктического лета поверхностные воды успевают проделать значительную геохимическую работу.

Для гранитоидных формаций соотношение вынесенных реками растворенного и терригенного материалов оказывается также довольно высоким – до 3,2 (см. табл. 1). Однако для этих пород показатели ионного стока не могут характеризовать интенсивность химического выветривания, что следует из результатов изучения строения и состава современного элювия на массивно-кристаллических породах, которые указывают на очень незначительное участие процессов химического выветривания в преобразовании исходных материнских субстратов. Почвенные профили и элювиальные образования имеют здесь преимущественно обломочный характер, стадийные изменения слюд и полевых шпатов практически отсутствуют, а новообразование тонкодисперсного материала приурочено к самым верхним горизонтам почвы, достигает всего 10–15 % и быстро уменьшается с глубиной [Таргульян, 1971]. Очевидно, здесь действуют другие процессы и механизмы, связанные с ведущим гипергенным фактором преобразования большинства силикатных пород – их многократным промерзанием–оттаиванием.

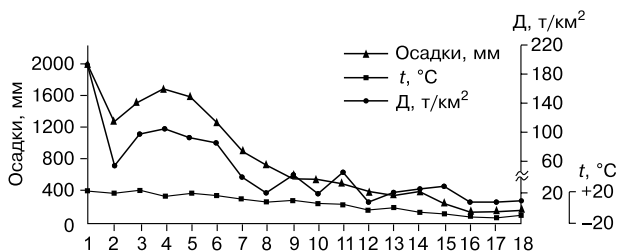
На это же указывают результаты последних обобщений по стоку растворенных веществ в речных бассейнах мира. Ранее утверждалось, что тундра и лесотундра, а также более южные районы криолитозоны входят в особый, холодный ряд зон, где из-за низких температур достаточно высокий водный сток не может при-



**Рис. 1. Соотношение годовых величин твердого стока и стока растворенных веществ в реках Восточного Саяна и Забайкалья [Таргульян, 1971].**

Стоки: А – твердый, Б – растворенных веществ. Реки: 1 – Турка, 2 – Витим, 3 – Ия, 4 – Малая Белая, 5 – Снежная, 6 – Верхняя Ангара, 7 – Тья, 8 – Уда, 9 – Большая, 10 – Би-рюса.

вести к сколько-нибудь значительной химической денудации. Однако недавно было показано, что величина стока растворенных веществ в бассейнах Оби, Енисея, Лены, Индигирки, Яны, Колымы весьма существенна и превышает величину атмосферных осадков, в отличие от бассейнов рек, расположенных в умеренных и теплых зонах [Денмухаметов, 2005] (рис. 2). Это, вероятно, свидетельствует о наличии дополнительных (возможно, криогенных) механизмов обогащения поверхностных вод растворенными веществами. На такое же предположение указывает вывод, что гляциальный и субнивальный пояса горных стран отличаются повышенным стоком растворенных веществ с учетом того, что в этих поясах гор важным гипергенным фактором разрушения силикатных пород является процесс их многократного промерзания–оттаивания.



**Рис. 2. Широтная изменчивость осадков, температуры и стока растворенных веществ (Д) в бассейнах крупнейших рек Азии [Денмухаметов, 2005].**

Реки: 1 – Иравади, 2 – Меконг, 3 – Красная, 4 – Ганг–Брахмапутра, 5 – Цзуцзян, 6 – Янцзы, 7 – Хуайхэ, 8 – Хуанхэ, 9 – Хайхэ, 10 – Ляохэ, 11 – Далинхэ, 12 – Амур, 13 – Обь, 14 – Енисей, 15 – Лена, 16 – Индигирка, 17 – Яна, 18 – Колыма.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью изучения химических эффектов, возникающих в результате многократного циклического воздействия промерзания–оттаивания на основные группы магматических пород, были проанализированы имеющиеся данные опытов по попеременному промерзанию скальных пород, проведенные В.М. Гуревич [1992], и данные собственных экспериментов. Эти эксперименты по существу не отличались от проведенных ранее и состояли в приготовлении фракций минералов и пород (для гранита это щебень 25–5 мм, для кварца и альбита фракции указаны в табл. 2). Приготовленные фракции помещались в пластмассовые бюксы и заливались (по 50 мл) дистиллированной водой, а затем выдерживались при соответствующих температурах 12 ч. После 100 циклов изменения температуры вода из бюксов сливалась и анализировалась по стандартной методике.

Основной исследуемый параметр – потеря массы растворенного вещества в процентах от исходной массы экспериментального образца породы или минерала за один цикл промерзания–оттаивания (см. табл. 2). Главный вывод, который следует из сравнительного анализа данного параметра: магматические горные породы образуют закономерный ряд по потере растворенного вещества под воздействием циклов промерзания–оттаивания. Наименьшие значения характерны для долеритов (основные породы), почти на порядок выше потери растворенного вещества у андезита (средние породы) и максимальные значения (на несколько порядков выше) у гранитов (кислые породы). При этом если оценить потери растворенного вещества для главных составляющих гранит минералов (кварца и полевых шпатов), то оказывается, что шпаты (в экспериментах – альбит) дают наибольший выход при колебаниях температуры в положительном спектре, а кварц – при переходе через нуль. Таким образом, следующий важный вывод заключается в том, что в случае развития криогенеза основным поставщиком растворенных веществ служит кварц. Причиной этого, вероятно, является сама природа кварца как минерала, для которого характерны внутри- и межкристаллические замкнутые гипогенные газожидкие включения. Они заполнены главным образом слабоминерализованными водными растворами, в которых преобладают ионы Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, SiO<sub>3</sub>. Газовая фаза часто представлена CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub> и др. В этих включениях может присутствовать и твердая фаза, представленная так называемыми минералами-узниками (в основном галитом, сильвинитом и др.). Ведущая роль в составе включений принадлежит жидкой фазе, именно поэтому в литературе они иногда на-

Таблица 2. Потери растворенного вещества различными типами горных пород и минералов в результате воздействия циклов промерзания–оттаивания

Порода, минерал	Номер образца	Режим промерзания		Потери* растворенного вещества $\times 10^6$	Источник
		Температура, °С	Время, ч		
Долерит, Западная Якутия	1	–30...+20	8(4–4)	75	[Гуревич, 1992]
	2			75	
	3			80	
	4			30	
	6			45	
	10			45	
	12			60	
	13			35	
	17			85	
	18			75	
	24			35	
	27			45	
	Андезит, Агинское месторождение (долина р. Камчатки)			1	
2		175			
3		236			
4		270			
5		203			
6		267			
7		382			
Гранит, Карелия, Онежское озеро	1	0...+20	24(12–12)	8789	Настоящая работа
	2	–20...+20		2898	
	3	–20...0		5314	
Песок кварцевый лоберецкий 0,25–0,1 мм	1	0...+20	24(12–12)	1687	Там же
	2	–20...+20		5925	
	3	–20...0		4935	
Песок кварцевый лоберецкий 0,5–0,25 мм	1	0...+20	24(12–12)	3551	«
	2	–20...+20		3321	
	3	–20...0		4033	
Альбит, дробленый 0,5–0,25 мм	1	0...+20	24(12–12)	10 486	«
	2	–20...+20		4683	
	3	–20...0		5245	

\* В процентах за один цикл в условиях полного заполнения пор водой.

зываются первичными включениями жидкости в кристаллах. Большая часть включений заключена в полостях размером до 0,01 мм в поперечнике. Но иногда в кварцевых жилах встречаются включения, наполненные так называемым маточным (или остаточным) раствором в полостях гораздо большего размера – до нескольких сантиметров в поперечнике. Возможность разрушения кристаллов кварца с крупными газовой-жидкими включениями в результате замерзания содержащихся в них жидкостей известна с конца XIX в. [Hidden, 1882]. С. Тэбер [Taber, 1950] использовал это явление для палеоклиматических интерпретаций. Изучая склоновые процессы в южных атлантических штатах США, он пришел к выводу, что наличие невоскресших газовой-жидких включений в кристаллах кварца

погребенных почв штата Северная Каролина указывает на отсутствие здесь перигляциального климата в висконсинское время. Было также показано [Рогов, 1987, 2000], что существенную роль в криогенном разрушении кварца играют и газовой-жидкие включения небольших (вплоть до микроскопических) размеров. Все зависит от степени понижения температуры: при достаточном охлаждении в полостях включений происходит кристаллизация жидкой фазы, рост давления и, как следствие, разрушение кристалла. Феномен разрыва кристаллов тех или иных минералов вследствие фазовых изменений вещества включений при охлаждении используется для определения температуры и давления, при которых образовались данные кристаллы (криометрический метод [Мельников, 1968]).

На основе приведенных данных можно констатировать, что ведущую роль в химическом стоке в районах территории криолитозоны, сложенных гранитами и гранитоидными формациями, играет процесс вскрытия полостей газовой-жидких включений и высвобождения в них растворов. Фазовые изменения вещества газовой-жидких гипогенных включений в кристаллах в процессе их охлаждения и связанную с ними дезинтеграцию минералов было предложено называть криокриптогенезом [Конищев, 1988]. Эффективность криокриптогенеза, очевидно, возрастает по мере увеличения степени охлаждения и размера газовой-жидких включений. Полярный, ультраконтинентальный климат и условия высокогорий наиболее благоприятны для проявления криокриптогенного механизма разрушения пород и минералов. Магматические породы кислого состава с преобладанием в составе кварца в максимальной степени подвержены собственно криокриптогенному разрушению. Относительная роль криокриптогенеза в ряду магматических и метаморфических (кислые, средние, основные) породы → осадочные цементированные породы → дисперсные грунты, очевидно, падает, поскольку количество газовой-жидких включений по мере разрушения и увеличения зрелости пород уменьшается.

Результаты экспериментов, представленные в табл. 2, позволяют сделать также следующие выводы. Один из них состоит в том, что минерализация жидких включений увеличивается по мере уменьшения размеров последних. Результаты экспериментов по криогенному разрушению частиц разной фракции кварцевого люберецкого песка указывают на то, что вскрытие полостей включений происходит не только под влиянием фазовых переходов заполняющих их растворов, но и под влия-

нием температурных колебаний. Исходя из результатов эксперимента можно предположить, что температурные колебания в положительном спектре температур (+20...0 °С) достаточно эффективны для высвобождения растворов из полостей, относящихся к межкристаллическому типу. Для вскрытия внутрикристаллических полостей, возможно, необходимы более резкие температурные колебания, обеспечивающие фазовые переходы раствор ↔ лед.

Разрушение полостей газовой-жидких включений – не единственный механизм обогащения химического стока различными элементами и соединениями. Определенный вклад в химический сток связан с процессом растворения минералов, в частности полевых шпатов, что следует из результатов эксперимента (см. табл. 2). С целью выяснения данного предположения поверхность частиц гранита экспериментальных образцов была изучена с помощью растрового электронного микроскопа. На этой поверхности легко диагностируются составляющие гранит минералы: зерна кварца имеют раковистый излом, полевого шпата – хорошо выраженные линии спайности, биотит представлен листовидными агрегатами. При использовании достаточного увеличения на поверхности кварца отчетливо видны вскрытые полости газовой-жидких включений, от которых исходят трещины (один из примеров приведен на рис. 3). Зерна полевого шпата тоже имеют трещины, располагающиеся вдоль плоскостей спайности, но наибольшие изменения характерны для дисперсных осколков этого минерала – на них заметны формы растворения. При этом, чем меньше размер осколков, тем ярче проявляются следы растворения (рис. 4). Агрегаты биотита значительно расщеплены, встречаются отдельные листочки, на которых

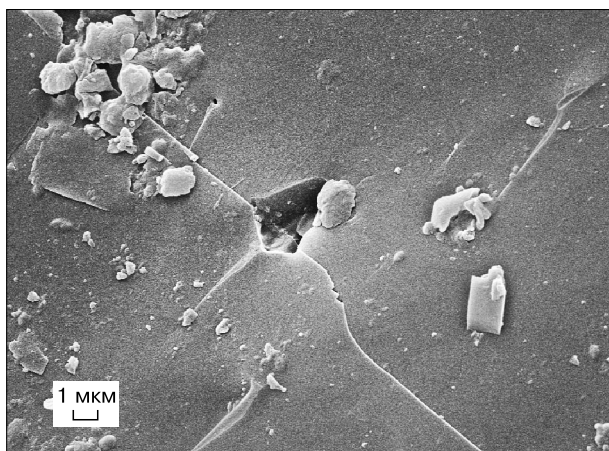


Рис. 3. Трещина в зерне кварца, рассекающая полость газовой-жидкого включения.

Образец гранита после 100 циклов промерзания – оттаивания.

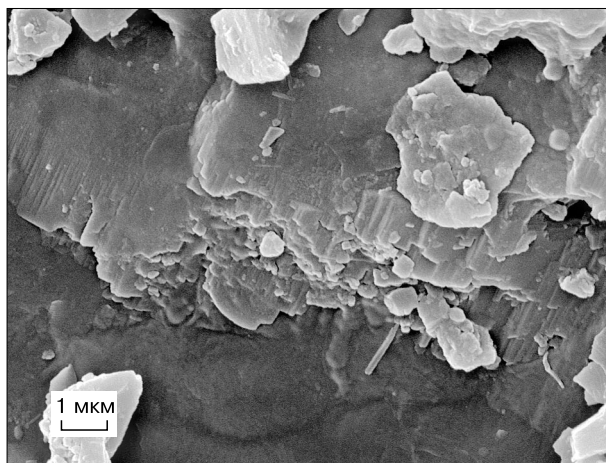


Рис. 4. Характер растворения обломка полевого шпата.

Образец гранита после 100 циклов промерзания – оттаивания.

заметны агрегаты образований округлой формы, возможно, коллоидного железа. В целом микроскопические исследования подтвердили сделанные выше выводы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате экспериментальных исследований количественные оценки (см. табл. 2) позволяют приблизительно рассчитать вклад эффекта криокриптогенеза и растворения в сток рек различных географических поясов. Если принять потерю растворенного вещества гранитом за один цикл промерзания–оттаивания, то за год (около 50 циклов) эта величина составит 0,15 %. У рек, дренирующих территории криолитозоны, сложенные гранитоидными формациями, часть ионного стока формируется на междуречьях в слое сезонного оттаивания и, возможно, часть в слое годовых теплооборотов. Для простоты расчетов примем среднюю мощность слоя сезонного промерзания–оттаивания равной 1 м, а объемную массу скелета элювия гранитоидных пород – 1,5 г/см<sup>3</sup>. Тогда при площади водосбора, например, 3,84 тыс. км<sup>2</sup> (бассейн р. Чульман) и рассчитанном на основе данных эксперимента темпе криокриптогенной экстракции ионов количество освобожденных растворимых соединений из гранита составило бы более 9000 т/(км<sup>2</sup> · год), что существенно больше величины химического стока, определенного на основе минерализации речной воды. Ясно, что значительная часть ионного стока задерживается в грунтовой массе на пути миграции к руслу реки, в створе которой происходит формирование стока растворенного вещества.

Во всяком случае, полученные результаты и приближенные количественные оценки являются достаточно серьезным аргументом, позволяющим с иных позиций интерпретировать данные по ионному стоку и оценивать соотношение темпов криогенного и термического выветривания, с одной стороны, и химического – с другой. В общей доле химического стока рек в области многолетней мерзлоты криогенный компонент составляет весомую часть. С учетом возможности криокриптогенного обогащения грунтовых и, следовательно, речных вод водорастворимыми соединениями интен-

сивность собственно химического выветривания магматических, в частности гранитоидных, пород в области современного криогенеза по крайней мере на порядок ниже, чем криогенного выветривания, включающего помимо ионной и твердую составляющую.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-05-64408-а) и фонда “Бедущие научные школы”.

### Литература

- Гуревич В.М.** Особенности преобразования андезитов и долеритов в процессе криогенного выветривания: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Якутск, 1992, 25 с.
- Денмухаметов Р.Р.** Сток растворенных веществ и химическая денудация в речных бассейнах мира: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Казань, 2005, 22 с.
- Коницев В.Н.** Криогенез и химическая денудация // Денудация в криолитозоне. М., Наука, 1991, с. 4–9.
- Коницев В.Н.** Соотношение криогенных и некриогенных факторов гипергенеза в области вечной мерзлоты // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1988, № 1, с. 8–14.
- Коницев В.Н.** Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере. Новосибирск, Наука, 1981, 195 с.
- Макаров В.Н.** Подвижность химических элементов в перигляциальном литогенезе // Миграция химических элементов в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1985, с. 50–61.
- Мельников Ф.П.** Криометрический метод исследования включений образцов минералообразующей среды. Минералогическая термометрия и барометрия. М., Наука, 1968, т. II, с. 38–45.
- Основные гидрологические характеристики.** М., Гидрометеоиздат, 1967; 1975.
- Рогов В.В.** О роли газовой-жидких включений в механизме криогенного разрушения кварца // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1987, № 3, с. 81–85.
- Рогов В.В.** Особенности морфологии частиц криогенного элювия // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 67–73.
- Таргульян В.О.** Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях (на массивно-кристаллических и песчано-полимиктовых породах). М., Наука, 1971, 267 с.
- Akerman G.N.** Notes of chemical weathering. Kapp. Linne, Spitsbergen // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Permafrost, Washington, Natl. Acad. Press, 1983, p. 10–15.
- Hidden W.E.** A phenomenal find of fluid-bearing quartz crystals. New York, Acad. Sci., 1882, vol. 1, p. 131–136.
- Taber S.** Quartz crystals with clay and fluid inclusion // J. Geol., 1950, No. 58, p. 37–48.

*Поступила в редакцию  
6 апреля 2006 г.*