

УДК 574

ЗАКИСЛЕНИЕ ВОДОСБОРОВ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ*

© 2012 г. Моисеенко Т.И.^{*}, Калабин Г.В.^{**}, Хорошавин В.Ю.^{*** 1}

^{*}Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,

^{**}Институт проблем комплексного освоения недр РАН

^{***}Тюменский Государственный Университет

Рассматривается проблема антропогенного закисления водосборов арктических регионов. Приведены данные об уязвимости территорий к кислотной нагрузке. На примере Кольского субарктического региона дается детальная характеристика факторов и механизмов закисления почв и вод, а также экологических последствий для наземных и водных экосистем.

Арктические регионы России, подверженные кислотной нагрузке вследствие выбросов кислотообразующих агентов в атмосферу крупными медно-никелевыми плавильными производствами, расположенными за полярным кругом: ОАО “ГМК Норильский никель”, комбинаты “Североникель” и “Печенганикель” ОАО “Кольской ГМК”, крупными и мелкими теплоэнергетическими станциями, а также за счет трансграничного переноса загрязненных окислами азота и серы воздушных масс из южных и юго-западных регионов России и стран Западной Европы.

Окислы серы – преобладающий компонент аэротехногенных выбросов в российской Арктике. В результате сложных циклов взаимодействия в атмосфере диоксид серы превращается в серную кислоту и выпадает на подстилающую поверхность [5]. Значимый вклад в закисление почв и вод оказывает сухое поглощение окислов серы и аэрозольное осаждение [9, 30]. Кислотные осадки, претерпевая изменения в почвах, вызывают их закисление и частично нейтрализуются или выносятся в дальнейшем в водотоки. При этом процесс закисления вод не будет развиваться, пока кислотная нагрузка не превысит способность подстилающей поверхности ее нейтрализовать и критический уровень накопления кислотообразующих агентов. Если структура ландшафтов и слагающие ее почвы кислые, то закисление вод будет развиваться достаточно стремительно, поскольку протоны H^+ и алюминий (Al^{n+}) будут сопровождать подвижные анионы NO_3^- или SO_4^{2-} в

формируемых на ландшафтах водных потоках. При более высокой буферной емкости почв развитие закисления вод будет определяться объемами накопления кислотообразующих агентов.

Цель работы – выявить особенности и механизмы антропогенного закисления водосборов в арктических регионах, а также по имеющимся многочисленным исследованиям, характеризующим закисление почв и вод на Кольском полуострове и ограниченной информации по другим регионам российской Арктики сформировать представление о значимости этого феномена для всего арктического региона.

Уязвимость арктических водосборов к закислению. Интенсивность антропогенного закисления почв и вод определяется: а) уровнем аэротехногенной нагрузки кислотообразующих веществ с учетом продолжительности ее действия и б) природной чувствительностью территории по геологическим, почвенным, ландшафтно-географическим и климатическим факторам. Литологические условия формирования химизма почв и вод выступают важным фактором, определяющим буферную емкость водосборов. Основными геологическими структурами, определяющими уязвимость территорий к кислотной нагрузке в пределах арктической зоны являются

- граниты, гранито-гнейсы, а также другие кремнистые формации;
- песчаные кремнистые породы;
- относительно древние, сильно выветренные породы, покрытые выщелоченной почвой;
- молодые гляциальные отложения, на которых почвенный покров не развит, а формирование состава вод определяется атмосферными осадками.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 09-05-00467 и № 10-05-00854) и Правительства РФ (Грант № 11G34.31.0036).

По результатам анализа данных о геологических и геохимических структурах [3, 8] можно сделать заключение, что западная часть российской Арктики (атлантический сектор) и многие участки центральной части (сибирский сектор) чрезвычайно уязвимы к закислению, тогда как Дальневосточные регионы обладают более высокими буферными свойствами (за исключением ряда гляциальных районов, возвышенностей и гор).

По отношению к кислотным осадкам G.C. *Kuylenstierna* et al. [26] выделяют пять классов чувствительности почв по их насыщению обменными основаниями: 1 – от 0 до 20% (наиболее чувствительные), 2 – 20–40%, 3 – 40–60%, 4 – 60–80% и 5 – 80–100% (наименее чувствительные). Если принять во внимание эти данные, то почти половина территории российской Арктики уязвима к кислотным нагрузкам. Исследования [1] подтверждают наличие уязвимых маломощных почв на Кольском п-ове, а также в восточных тундровых арктических и субарктических регионах Приуралья, Западной и Центральной Сибири, в местах расположения глеевых мерзлотно-таежных почв Восточной Сибири и Дальнего Востока – бассейны нижнего течения рек Лены, Яны, Индигирки и Колымы. Следует отметить, что короткий вегетационный период, низкие температуры и близкое залегание мерзлоты также способствуют замедленному разложению органического вещества и накоплению большого количества гумусовых кислот в верхних органогенных горизонтах почв.

Природные особенности формирования химического состава вод в арктических регионах предопределяют их уязвимость к кислотным осадкам по следующим причинам:

- питание озер и рек в большей степени определяется атмосферными осадками, до 75–90% годового стока приходится на весеннее половодье и летне-осенний дождевой паводок;
- аккумуляция атмосферных выпадений в снежном покрове происходит в течение длительной зимы (6–8 месяцев), а кислоты с талой водой в короткий период весеннего половодья поступают в водосборные бассейны, вызывая “рН-шок”;
- в период снеготаяния почва находится в промерзшем состоянии, так что ее верхний слой практически водонепроницаем в течение почти всего периода;
- высокий дренаж выпадающих осадков и низкая нейтрализация кислот обеспечиваются в летнее время за счет разреженной растительности и тонкого почвенного покрова;
- низкие среднегодовые температуры воздуха ослабляют процессы водной эрозии, следствие этого – низкая минерализация воды; неразвитость почвенного покрова делает геохимический состав подстилающих пород определяющим фактором в формировании состава поверхностных вод и их уязвимости к кислотным потокам;
- формирование поверхностного стока в условиях избыточного увлажнения обуславливает низкую минерализацию и олиготрофный характер вод, так как коренные породы в холодном климате мало выщелачиваются, четвертичные отложения сильно перемыты, почвенный покров тонкий, т.е. гумидный режим обуславливает промывание почв, вызывая их обеднение основными катионами;
- преобладание атмосферных выпадений над испарением и замедленные процессы минерализации органического вещества приводят к образованию на водосборе арктической зоны большого количества заболоченных озер с высоким содержанием гумуса и природно-кислыми водами, так называемыми “Wetland pond”.

Из изложенного понятно, что кислотные выпадения в холодном арктическом климате имеют более выраженные эффекты влияния на почвы и воды по сравнению с южными регионами, которые усиливают природное подкисление аутогенными процессами, как будет показано ниже.

Следует отметить, что расположение основных плавильных производств ОАО “ГМК Норильск-никель”, обуславливающих высокую нагрузку кислот на водосборы, приурочено к районам, обладающим горными породами с высокими буферными свойствами. Однако уже на удалении от них на 100 км и более распространены геологические образования, уязвимые к кислотным выпадениям, поэтому закисление водосборной системы не является прямой функцией выпадения кислот, а определяется рядом биогеохимических условий на водосборе и может проявиться мозаично.

Превращения выпадающих кислот и закисления почв. Все химические вещества, выбрасываемые в атмосферу, в конечном итоге с осадками или сухими выпадениями попадают в почву на водосборах, где подвергаются биогеохимической трансформации, и выносятся в ручьи и водные системы.

Серная кислота (H_2SO_4) вызывает изменение природных геохимических циклов элементов в почве, на водосборе и водоемах. Сульфаты, поступающие с атмосферными выпадениями, проходят

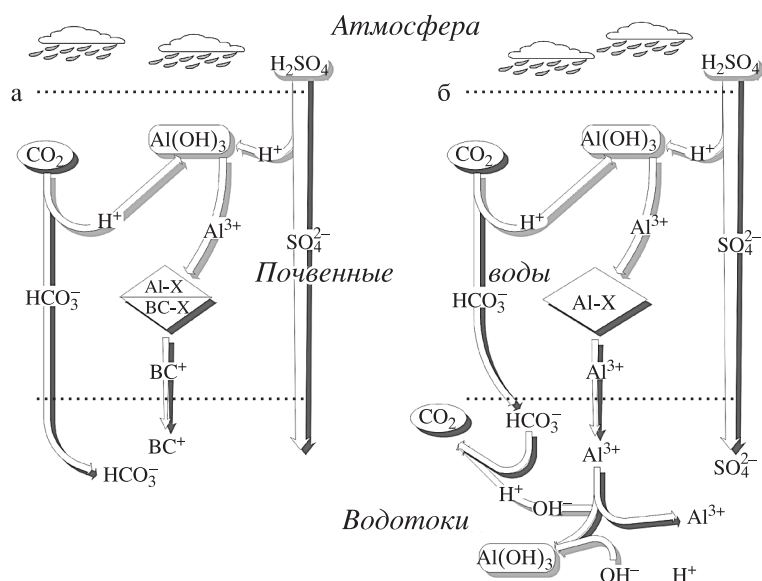


Рис. 1. Схема реакций почвы на поступление серной кислоты: *а* – при высоком насыщении основаниями; *б* – в отсутствие ионно-обменных оснований.

сквозь почвенную систему, но частично в ней могут абсорбироваться или редуцироваться. Протоны H^+ , выпадающие в сочетании с SO_4^{2-} , дополнительно выщелачивают алюминий из минерального окружения или изменяют форму его нахождения, который в свою очередь в дальнейшем усиливает ионно-обменные процессы в почве. Ионы алюминия $[Al^{3+}]$ в водных системах не уравниваются эквивалентами гидрокарбонатов (HCO_3^-). Частичный переход в нерастворимую форму $Al(OH)_3$ при взаимодействии с HCO_3^- приводит к высвобождению дополнительных протонов [9]. По мере снижения содержания в почвах обменных оснований увеличивается содержание подвижной формы алюминия, который также мигрирует в водоемы. Соответственно уровень выноса алюминия с водосбора в водные объекты зависит от насыщения почв обменными основаниями, которое в свою очередь определяется составом материнской горной породы. Если почва слабо насыщена основаниями, что характерно для арктической зоны, нейтрализация кислотных выпадений не происходит. Протоны способствуют переходу алюминия в ионную форму, которая мигрирует в водные системы (рис. 1).

Азотная кислота (HNO_3) имеет более сложную систему биогеохимических превращений. Как и серная,

она относится к сильным кислотам и может выступать закисляющим агентом, вытесняя более слабые природные кислоты – гумусовые и гидрокарбонаты [13]. В слабонасыщенных катионами и органическим веществом почвах (например, в гляциальных и тундровых районах) механизм влияния азотной кислоты может быть сопоставим с воздействием серной, частично способствуя их закислению. Вместе с тем нитратный анион способен поглощаться растительностью и депонироваться в составе органического вещества, а протоны транспортироваться в водные системы. В процессе денитрификации нитратный анион способен восстанавливаться в молекулярный азот (рис. 2). Увеличение потока нитратов в наземные экосистемы со слабым насыщением на первых этапах стимулирует рост растений, в дальнейшем, когда объемы поступления азотных соединений превысят потребности почвенных

организмов и растений, нитраты поступают в водные объекты в больших количествах, вызывая их закисление. В глобальном масштабе показано, что значимость азота как кислотообразующего агента для арктической зоны будет возрастать [14].

Если выпадения нитратов на водосборы арктической зоны по объемам в 3–5 раза ниже сульфатов [5], то их концентрация в воде составляет десятые и сотые доли от концентрации сульфатов, что свидетельствует о высокой степени утилизации данного иона, как важного биофильного элемента [9], в наземной и водной экосистемах.

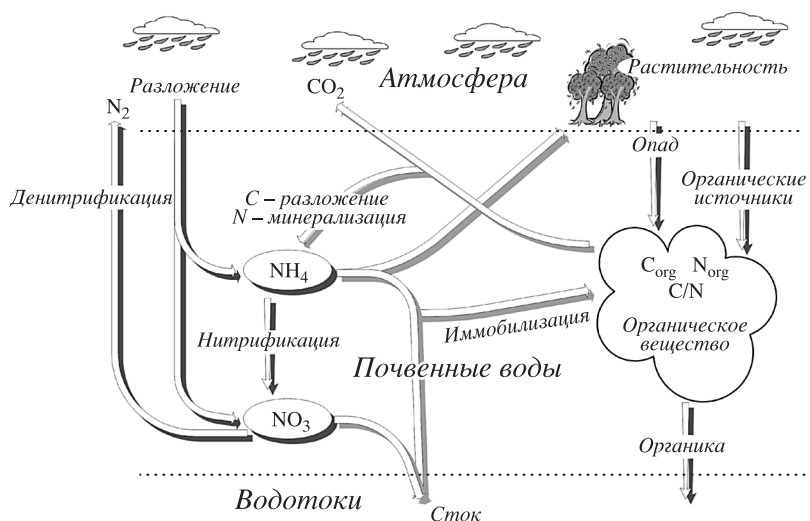


Рис. 2. Схема превращений запаса и потоков неорганического и органического азота в почвах.

Таблица 1. Концентрации химических элементов в почвенных горизонтах в окрестностях Мончегорска и Норильска [10]

	Глубина горизонта, см	pH	C, %	Ca, мг/кг	Mg, мг/кг	Cu, мг/кг	Ni, мг/кг	S, мг/кг
Мончегорск	0	3.9	11.6			1370	2030	446
	3	4.4	3.11	39 800	37 300	366	541	122
	20			42 400				
	40	4.8	3.7	49 900	48 200	52.0	72.9	175
	82	5.4	0.5	54 900	43 100	62.2	60.3	95.4
Норильск	5–6	6.4	22.9		7340	2180	2820	3580
	13	7.1	1.61	43 100	24 200	64.5	45.0	247
	25	7.6	2.3	44 200	27 400	50.3	37.0	173
	49	8.6	0.81	62 900	29 200	50.6	31.0	122
	70	8.6	1.1	73 900	30 900	53.5	32.5	< 100

В то же время нельзя совсем исключать этот анион при рассмотрении проблем закисления вод арктических регионов. Известно, что котельные и ТЭЦ, работающие на каменном угле и мазуте, содержат в своих выбросах окислы азота, поэтому этот агент усиливает антропогенное закисление, особенно на локальном уровне.

Характеристики почв на Кольском Севере и в Норильском регионе очень вариабельны, однако их общей характеристикой в зоне влияния выбросов диоксида серы плавильными производствами являются низкие pH водных вытяжек верхнего органогенного слоя и крайне низкое насыщение обменными основаниями [18]. В табл. 1 приведены некоторые характеристики почв в зонах влияния медно-никелевых плавильных комбинатов.

Самые высокие содержания серы отмечаются в окрестностях Норильска. При этом в районе озера Лама (так называемом условно-фоновом районе) значения pH почв варьируют в пределах от 5.1 до 6.2, а в районе распространения четвертичных отложений – от 7.1 до 8.6. Эти значения pH значительно выше значений в районе комбината “Североникель” и объясняются высокими концентрациями в почвах кальция и магния вокруг Норильского комбината. Можно сделать заключение, что почвы в непосредственной близости от Норильского комбината нечувствительны к кислотным выпадениям [18].

Детальные исследования, проведенные на Кольском Севере [16, 17], позволяют сделать заключение о важной роли биоценологических (аутогенных) процессов в формировании кислотности и поглощательной способности почв северных бо-реальных хвойных лесов. Изменения кислотности

твердых и жидких фаз Al–Fe-гумусовых подзолов в процессе техногенной сукцессии северотаежных лесов, вызванной воздушным промышленным загрязнением, носят зачастую нелинейный характер по отношению к количеству кислотообразующих веществ, выпадающих из атмосферы.

Роль биоценологического фактора в формировании кислотности и поглощательной способности почв подчеркивается парцеллярными различиями: разной интенсивностью потоков кислотообразующих веществ подкороновых и межкороновых парцеллах, а также обогащенностью растительного опада (хвоя и листья вечнозеленых кустарничков) основными катионами. Актуальная кислотность слоев подстилки, формирующихся в подкороновых пространствах, где наблюдается интенсивный поток кислотообразующих веществ, значительно ниже, чем в межкороновых пространствах [16, 17]. При этом кислотность резко возрастает к глубине до 5 см, т.е. наиболее кислым является слой, характеризующийся наибольшей степенью разложения растительных остатков (рис. 3).

Закисление природных вод. Интенсивному закислению подвержены преимущественно широко распространенные к арктической зоне малые озера и ручьи, водосборы которых формируются на кислых коренных породах с тонким почвенным слоем.

Среди факторов, контролирующих снижение кислотонейтрализующей способности вод, выделяются следующие: разбавление более кислыми атмосферными осадками в период дождевого паводка или весеннего половодья; поступление серной кислоты из природных и антропогенных источников (приоритет последних очевиден),

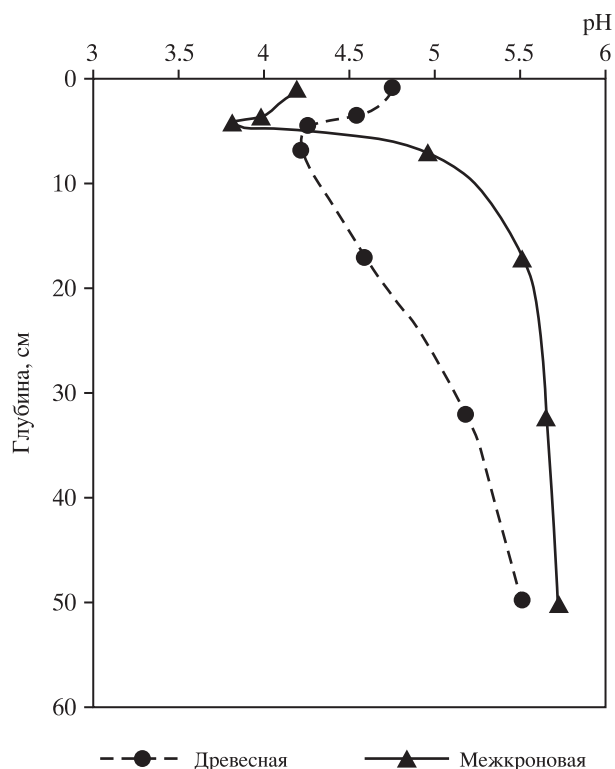


Рис. 3. Внутрипрофильная трансформация фактической кислотности в почве в подкроновом и межкroновом пространствах [13].

включая потоки из атмосферы и их аккумуляцию на водосборе; поступление азотной кислоты с осадками или высвобождение ее из верхнего органического слоя почв; поступление органических кислот (наиболее подвижной фракции) из почв и болот, расположенных на водосборе; высвобождение соляной кислоты вследствие ионно-обменных превращений морских аэрозолей на прибрежных арктических водосборах. В большинстве случаев механизм закисления определяется комбинацией нескольких факторов, которые взаимно могут усиливать действие друг друга [13].

Следует отметить, что низкие значения pH не всегда свидетельствуют об антропогенном закислении вод. Они могут быть обусловлены также и их природным подкислением при больших концентрациях гумусовых кислот. На заболоченных водосборах, широко развитых в арктической зоне, существуют кислые дистрофные озера при цветности вод 100 °Pt и выше. Органические кислоты могут в ряде случаев являться важным фактором уменьшения кислотонейтрализующей способности вод. Естественное разложение и окисление углерода в органическом слое заболоченных лесных водосборов могут производить протоны H^+

[15, 22]. В течение сухих периодов протоны H^+ и органические анионы накапливаются в верхних слоях почв и могут вызывать резкое снижение кислотности в ручьях и небольших озерах в периоды ливней и половодья [29]. Авторы [15] доказали, что водные системы в Северной Америки и Норвегии с высокой цветностью вод более уязвимы к антропогенному закислению вследствие низких потоков кальция с данных водосборов.

В 1995 г. среди обследованных 460 озер на Кольском полуострове кислые озера с $pH < 6$ составили 26%, 11% имели значения $pH < 5$. В состоянии риска закисления находилось около 30% обследованных озер, т.е. щелочность составляет менее 50 мкэкв/л и $HCO_3 < SO_4$. Наиболее критическая ситуация с закислением вод на Кольском полуострове проявилась в его северных и восточных районах распространения тундр, геологическая структура которых представлена гранито-гнейсовыми формациями, эта территория чрезвычайно уязвима к кислотной нагрузке. Здесь до 30% озер оказались техногенно закисленными, анионный состав вод контролируется серной кислотой [9]. Исходя из анализа сочетания природных факторов и уровня антропогенной нагрузки для северных территорий Сибирского сектора Арктики, возможно предположить развитие процесса закисления в этих регионах. На удалении в 100–200 км на запад и юг от Норильского комбината распространены кислые коренные породы и кислотная нагрузка в современный период превосходит таковую на Кольском Севере.

В 2005 г. большая часть исследованных озер (Кольский регион и север Архангельской области) характеризовалась реакцией водной среды, близкой к нейтральной, и значениями цветности от 10 до 100 °Pt. В тундровой и таежной зонах доля озер с pH менее 6 и цветностью вод ниже 10 °Pt составила 5.8%, с цветностью менее 30° Pt – 5.8%, а сильно закисленных озер с pH менее 5 и цветностью менее 30 °Pt – 3.9%. В целом 10.6% озер в тундрово-таежном приарктическом регионе в настоящее время можно отнести к антропогенно закисленным озерам (табл. 2), что свидетельствует о снижении количества антропогенно закисленных озер по сравнению с 1995 г.

В мировой практике показатель кислотонейтрализующей способности (ANC) является общепринятым критерием закисления вод. Он определяется как разница между содержанием основных катионов в воде и анионов сильных кислот, т.е. отражает буферную способность вод к нейтрализации потока кислот в водоемах [24]. В зоне тундры обследованные озера имели значения ANC

Таблица 2. Распределение озер (%) по значениям pH и цветности вод (Цв, °Pt) в приарктических регионах – Мурманской и Архангельской областях (2005 г.). Всего исследовано 210 озер

pH	Цв, °Pt	< 10	10–30	30–60	60–100	> 100
	< 4		1.0	0.5	0.5	0
4–5		1.0	1.4	0	1.4	1.0
5–6		3.8	2.9	1.4	1.0	3.3
6–7		3.3	22.4	26.2	12.9	3.3
7–8		0.5	3.3	7.6	0	0.5
4–5		0	1.0	0	1.0	0
5–6		0	6.2	2.6	1.8	5.3
6–7		1.0	9.7	3.5	2.6	2.6
7–8		3.5	18.6	14.2	9.7	0
>8		1.0	13.3	1.8	1.0	0

в пределах от 0 – до 150 мкэкв/л, что указывает на высокую уязвимость вод данного региона к закислению. Для более 20% обследованных озер в этой зоне этот показатель был ниже критического (рис. 4).

В таежной зоне установлено возрастание вариабельности данного показателя, что связано с большей разнородностью ландшафтов и геологической структуры, слагающей водосборы. Процент озер в зоне тайги со значениями ANC ниже критического сопоставим с зоной тундры,

при этом здесь встречаются озера с отрицательными значениями показателя. Однако основная часть озер имеет показатель ANC в пределах 100–300 мкэкв./л.

Ландшафтная дифференциация водосборов также влияет на развитие процесса закисления вод [28]. Наибольших процент закисленных озер – это верховые озера автономных ландшафтов (рис. 5). По мере увеличения площади озер вероятность их закисления снижается, проточные озера площадью более 10 км практически не подвержены антропогенному закислению.

Природные низкие значения pH характерны также для лесных и заболоченных местностей. Эти озера отличаются от техногенно закисленных повышенным содержанием органического вещества и высокой цветностью вод. Заболоченность водосборов влияет на значения pH в том случае, если более 30% водосбора покрыто болотами [9]. При оценке процессов антропогенного закисления принято рассматривать озера с цветностью вод менее 30 °Pt. Однако в последних работах показано, что природно кислые озера с высоким содержанием гумусовых кислот, как выше упоминалось, уязвимы к антропогенному закислению [15, 22, 29]. Это может быть объяснено не только низкими потоками кальция с водосбора, но и процессами аутогенного подкисления вследствие разложения крупных молекул гумусовых веществ под действием кислот.

Закисление ручьев и феномен “pH-шока”.

Эпизодическое закисление вод – широко известный феномен, появляющийся на ручьях, малых реках и проточных озерах в период половодья, штормовых ситуаций или дождевого паводка [23, 34, 35]. Это явление получило название “pH-шока” вследствие резкого снижения pH (на 2–3 единицы) в течение

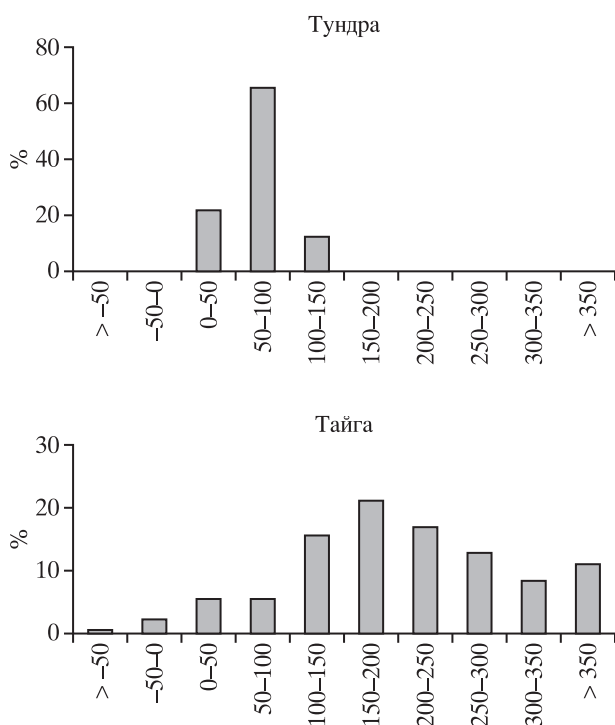


Рис. 4. Значения кислотонейтрализующей способности вод (ANC) исследованных озер в зонах тундры и северной тайги. Данные 2005 г.

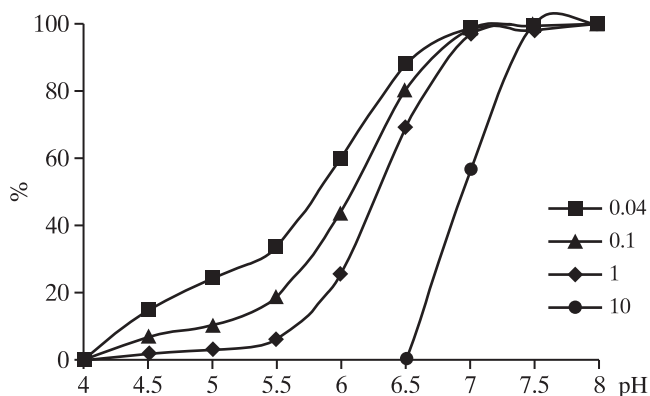


Рис. 5. Значения рН (%) в озерах различной размерности.

непродолжительного времени (от 1 дня в период ливней – до 2–3 недель в период половодья) и крайне негативного воздействия на водную фауну. Краткосрочное уменьшение рН и кислотонейтрализующей способности вод в течение гидрологических событий зарегистрировано в ряде арктических регионов Финляндии, Норвегии и Швеции и Атлантического сектора российской Арктики [14].

Следует отметить, что снижение рН на водных объектах в период половодья – природное явление: следствие разбавления минерализованных меженных вод низкоминерализованными атмосферными слабокислыми осадками, а также вымывания природных органических кислот с водосбора. Однако эти природные колебания не выражены резко и не приводят к губительным последствиям для водной фауны.

Исследование динамики рН вод на 21 ручье Кольского Севера выявило повсеместное эпизодическое закисление вод в период половодья [10]. Максимальный перепад значений рН характерен для вод тех ручьев, где наблюдались его наиболее высокие значения до начала снеготаяния, в то время как для закисленных ручьев (рН меженных вод < 6) выявлен незначительный перепад величин (рис. 6).

Более детально ежедневная динамика рН вод была исследована на примере трех типов ручьев, различающихся условиями формирования вод и характером протекания половодья: тундровом, лесном и горном. В более ранние сроки снижение рН наблюдается на тундровом ручье, водосбор которого приурочен к побережью Баренцева моря. В типичном для Кольского Севера лесном ручье в субарктической зоне наблюдается несколько пиков низких значений рН, которые появляются позднее, чем в тундровой зоне. Резкое снижение рН также характерно для вод ручьев, стекающих с гор, но оно происходит с запозданием – в более поздние сроки. Например, для ручья в Хибинских горах рН снизился с 7.2 до 4.7, максимальное его снижение наблюдается во второй половине июня – период стремительного схода снега в горах [10]. Таким образом, наиболее низкие значения рН вод ручьев в период максимального половодья характерны для горных и тундровых ручьев, водосборы которых представлены обнаженными коренными породами, имеют тонкий почвенный покров и слабо развитую растительность.

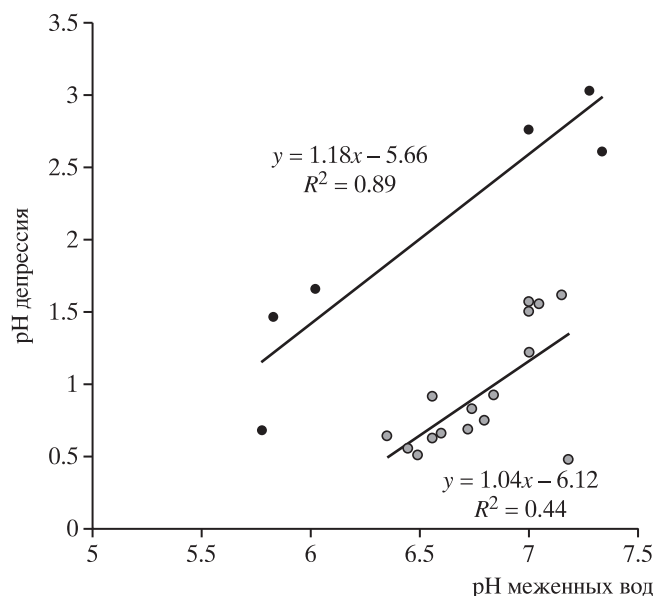


Рис. 6. Депрессия кислотности вод в половодье ручьев Кольского Севера в зависимости от ее значений для периода межени.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЗАКИСЛЕНИЯ

Экологические последствия закисления. Кислотные выпадения могут оказывать прямое и опосредованное негативное воздействие на наземные и водные экосистемы арктической зоны.

Наземные экосистемы. Прямое влияние высоких концентраций SO_2 , NO_x , NH_3 , O_3 в атмосфере выражается в следующем [16, 21, 31]: а) оказывают воздействие на листовую кутикулу, приводящее к физиологической засухе; б) вызывают сдвиг в распределении органического углерода в организме растения, приводя к ослаблению корневой системы; в) интенсифицируют выщелачивание элементов питания из листьев. Сильные минеральные кислоты повреждают листовую кутикулу и таким образом вызывают повреждение растений. При очень высоких уровнях NH_3 листья растений приобретают коричневый цвет вследствие токсичности соединений азота [33].

Влияние атмосферного загрязнения на леса может выражаться в снижении видового разнообразия, в возрастании чувствительности деревьев к инвазиям насекомых и различного рода болезням, а также к климатическим экстремумам, в снижении темпов роста, суховершинности и гибели отдельных деревьев [19]. В научной литературе принято, что негативное влияние на самые чувствительные виды растений начинает наблюдаться при среднегодовых концентрациях диоксида серы, превышающих 20 мкг/м³. Расчет полей концентраций диоксида серы на территории Мурманской области, выполненный с использованием модели климатического типа, показал, что превышение уровня на 20 мкг/м³ может наблюдаться на площади около 7700 кв. км вокруг металлургических комбинатов. На территории Норвегии эта зона охватывает 1400 кв. км, но не затрагивает территорию Финляндии [14].

Подкисление почв вследствие выпадений серы и азота опосредованно влияет через а) потери основных катионов из почвы, особенно магния, вызывающие дефицит этих элементов питания для деревьев; б) высвобождение растворимого токсичного алюминия, оказывающего влияние на рост тонких корней и ингибирующего поглощение основных катионов; в) снижение pH, что может влиять на процессы минерализации и, следовательно, на доступность элементов питания [27]. Предполагается, что повреждение лесов связано с подкислением почв, поскольку Al³⁺ токсичен для растений (повреждает тонкие корни) [28]. Подкисление почв и повышенные выпадения азота вызывают дисбаланс элементов питания в почвах и растениях [13, 26].

Увеличение доступности металлов в кислой почве может приводить к более интенсивному поглощению их растениями. Следовательно, отрицательное действие подкисления выражается не только в истощении почвенного поглощающего комплекса основаниями, но и в возрастании подвижности катионов Al³⁺, Fe³⁺, Mn²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺ и других металлов, повышенные концентрации которых в почвенном растворе могут быть токсичными для живых организмов [32].

Детальные комплексные исследования состояния лесов и почв на Кольском Севере на различном удалении от комбинатов “Севроникель” и “Печенганикель” позволили выявить следующие серьезные нарушения питательного режима [16, 17]:

- изменяется состав атмосферных выпадений – источника питания лесов;
- снижается эффективность использования атмосферной составляющей питательного ре-

жима в результате выпадения из сообщества лишайников и мохообразных, которые избирательно концентрируют элементы питания из атмосферы и передают их при разложении сосудистым растениям с корневой стратегией питания;

- возрастает кислотность почв и почвенных растворов и интенсифицируется выщелачивание элементов питания из органогенных горизонтов почв;
- обеднение почв доступными для растений элементами питания может быть обусловлено также нарушением микоризы и снижением интенсивности разложения органического вещества в результате ингибирования роста микроорганизмов (главным образом грибов) тяжелыми металлами;
- наблюдается дисбаланс в питании древесных пород (ели и сосны), выражающийся в обеднении хвои кальцием, магнием (вплоть до дефицита), марганцем и цинком и в обогащении наиболее мобильными элементами (азотом, калием, фосфором), а также поллютантами – серой, никелем и медью.

К сожалению, информация о воздействии кислот на тундровые экосистемы в других районах Арктической зоны практически отсутствует.

Водные экосистемы. В настоящее время известно, что основное негативное воздействие на водные организмы связано с изменением кислотности вод (pH), включая рост концентрации ионов водорода (H⁺), катионов неорганического мономерного алюминия, и тяжелых металлов. Анионы сильных кислот (SO₄²⁻ и Cl⁻) также могут влиять на состояние организмов, а нитраты (NO₃⁻) и аммоний (NH₄⁺) могут наносить ущерб опосредованно – за счет снижения кислотонейтрализующей способности вод (ANC). Известно, что при закислении вод уровень бактериальных процессов в водных экосистемах снижается, уменьшается количество сапрофитных бактерий, но численность грибов увеличивается, особенно за счет развития розовых дрожжей. Это снижает интенсивность процессов минерализации и приводит к накоплению крупного детрита на дне закисленных водоемов [9]. В ряде северных регионов увеличение кислотности связано со средообразующей деятельностью сфагновых мхов, которые способны активно поглощать катионы, высвобождая в процессе метаболизма протоны (H⁺) ионы, являющиеся дополнительным фактором опосредованного закисления. Продукция мхов в закисленных озерах в несколько раз выше по сравнению с озерами с нейтральной реакцией, тогда как содержание хлорофилла “а” на порядок

ниже [4]. Это указывает на повышение роли донных растительных сообществ в образовании первичной продукции закисленных водоемов.

В составе *сообществ* зоопланктона и зообентоса озер с низким рН по численности преобладают устойчивые к закислению виды. На примере малых озер горной тундры Кольского полуострова, испытывающих антропогенное закисление, было показано, что их экосистемы имеют бедный видовой состав и низкие количественные показатели животного населения [2, 12]. В табл. 3 представлены показатели различия в состоянии водных сообществ при различных уровнях рН: количество встреченных видов (N), индекс разнообразия Шеннона по численности (H_N бит.) и состав доминирующих комплексов в различных озерах Кольского Севера [11]. На всех уровнях организации водных экосистем характерно снижение биоразнообразия вследствие элиминации наиболее чувствительных видов к низким значениям рН.

Пресноводные рыбы, которые обитают в олиготрофных ручьях, реках и озерах Арктического бассейна, имеют повышенную чувствительность к закислению. Описано много примеров исчезновения отдельных видов или изменения численностей их популяций в водах Арктики, подверженных воздействию закисления; прослежена зависимость постепенного уменьшения разнообразия рыб с увеличением кислотности воды [9, 11, 14, 25, 27].

Особое внимание в последние годы было уделено резкому сокращению численности атлантического лосося в реках Норвегии, включая арктические регионы. Анализ статистики вылова рыб показал, что снижение запасов рыб связано

с закислением нерестовых рек [25]. Доказано, что атлантический лосось исчезает, если рН вод ниже 5.4, а ручьевая форель исчезает, когда уровень рН ниже 5.1. Главная причина деградации популяций рыб в закисленных водоемах – воздействие на рыбу низких рН и Al^{3+} , особенно на стадии личинки и малька [27].

Серьезные экологические последствия может иметь резкое кратковременное снижение рН вод ручьев. Для Кольского Севера в период половодья объем поступления металлов с водосбора в озера в течение снеготаяния (2–3 недели) может достигать 70% от годового, что усиливает стресс для водной фауны в сочетании с резким снижением рН, особенно весной, когда происходит развитие и выклев мальков рыб из икринок [9].

В закисленных условиях водной среды при низком содержании кальция происходит более активная аккумуляция многих элементов, включая такие высокотоксичные как Hg, Pb, Cd при их содержании в воде ниже порога аналитического обнаружения, что позволяет использовать рыб как индикаторов закисления вод. К сожалению, данные как о снижении рН вод в период половодья, так и влиянии сезонного закисления на лососевых рыб российской Арктики отсутствуют [9].

Закключение. Интенсивность закисления водосборов Арктической зоны определяется двумя основными факторами: уровнем аэротехногенной нагрузки кислотообразующих веществ с учетом продолжительности ее действия и природной чувствительностью территории по геологическим, почвенным, ландшафтно-географическим и климатическим факторам.

Таблица 3. Показатели биоразнообразия (N – количество видов, H_N – индекс Шеннона) и доминирующие виды экосистем водоемов Кольского Севера в условиях закисления [3]

	Ранг рН значений			Доминирующие виды при рН < 5
	> 6.5	5.0–6.5	4–5	
Фитопланктон N H_N	> 25 > 3.5	15–20 1.5–2.5	< 15 1.0–2.0	<i>Aphanothece clathrata</i> , <i>Gloecarsa</i> , <i>Mycrocystis</i> , <i>A. distans</i> , <i>Tabellaria quadrisepata</i>
Зоопланктон N H_N	> 30 > 3.5	10–25 1.0–3.0	< 10 < 2.0	<i>Holopedium gibberum</i> , <i>Bosmina obtusirostris</i> , <i>Eudiaptomus gracilis</i>
Зообентос N H_N	>100 > 3.0	20–100 1.5–3.5	< 20 0.5–2.0	<i>Chironomidae</i> , <i>Asellus aquaticus</i> , <i>Leptophlebidae</i> , <i>Nemoura</i> , <i>Polycentropodidae</i> , <i>Dytiscidae</i>
Рыбы N	> 6	1–2	0–1	<i>P. fluviatilis</i>

Выявленные особенности закисления почв и вод свидетельствуют, что природные условия арктической зоны предопределяют их проявление повсеместно и особенно интенсивно на территориях с экстремальными значениями техногенных нагрузок кислотообразующих веществ. Анализ данных о геологических и геохимических структурах позволяет заключить, что западная часть российской Арктики (атлантический сектор) и многие участки центральной части (Сибирский сектор) чрезвычайно уязвимы к закислению, тогда как Дальневосточные регионы обладают более высокими буферными свойствами.

По результатам исследований закисления почв и вод в Кольском регионе выявлены механизмы развития процесса, а также его негативные экологические последствия. Установлено, что кислотные выпадения в холодном арктическом климате имеют более выраженные эффекты влияния на почвы и воды по сравнению с южными регионами, которые усиливают природное подкисление аутогенными процессами. Кислотные осадки, выпадая на подстилающую поверхность, претерпевают изменения в почвах, вызывая их закисление, и могут частично нейтрализоваться или выноситься водотоками. При этом процесс закисления вод не развивается, пока кислотная нагрузка не превысит способность подстилающей поверхности к нейтрализации и критический уровень накопления кислотообразующих агентов.

Закисление вод зависит от сложных биогеохимических процессов и баланса процессов продуцирования и поглощения водородных ионов в наземных и водных экосистемах. Ему подвержены преимущественно малые озера и ручьи, водосборы которых формируются на кислых коренных породах с тонким почвенным слоем. В период половодья и дождевого паводка в арктических регионах наблюдается повсеместное снижение pH, которое наиболее характерно для горных и тундровых ручьев. Их водосборы представлены обнаженными коренными породами, имеют также тонкий почвенный покров и разреженную растительность.

Выпадения кислотообразующих веществ на водосборы и закисление вод оказывает как прямые, так и опосредованные воздействия на экосистемы, вызывая изменения в организмах и сообществах. На всех уровнях организации экосистем отмечается снижение биоразнообразия вследствие элиминации наиболее чувствительных к низким pH видов. Причина деградации популяций рыб в закисленных водных системах – непосредственное воздействие низких pH и Al^{3+} на рыб, организм и биохимические и физиологические нарушения в нем.

Полученные данные позволяют сформировать представление о значимости процессов закисления водосборов для всего Арктического региона.

Acidification of Drained Areas of Arctic Regions

T.I. Moiseenko*, G.B. Kalabin**, V.Yu Khoroshavin***

**Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS*

***Institute of Complex Development of Deposits, RAS*

****Tyumen State University*

Problems of anthropogenic protoxide of Arctic region are discussed. Data on vulnerability of Arctic territory toward the acid pressure and specific features of the process development are presented. On example of Kola subarctic region detailed characteristics to factors and mechanisms of soil and water protoxide are given. Characteristics of ecological consequences of the process development are given.