Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXII, вып. 2, 1971 г.

О МИГРАЦИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ СОЛЕЙ В ГУМИДНЫХ ОБЛАСТЯХ

А. И. Коротков

Соли морского происхождения, попадающие на сушу с атмосферными осадками и возвращающиеся в море с речным стоком, часто называют циклическими [14]. Роль таких солей в круговороте

море — атмосферные осадки — $\begin{matrix}\text{склоновый сток}\\ \text{грунтовый сток}\end{matrix}$ — речной сток — море

оценивается по-разному [11, 15]. Механизм поступления морских солей в атмосферу и их выпадения на сушу детально рассматривается в монографии Р. И. Грабовского [3]. Транспортирующая роль рек для поступающих в них грунтовых вод (в межень) и склоновых (в паводки) несомненна. Наиболее сложно выяснить роль атмосферных солей в формировании химического состава грунтовых и склоновых вод.

В табл. 1 приведены результаты подсчета поступления с осадками и выноса солей грунтовыми водами для отдельных водосборов или крупных

Таблица 1

Миграция солей на некоторых водосборах в гумидных областях

Территория	Статья баланса	Ионы, *т/год* на 1 *км*^{2}						
		Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Бассейн р. Медвенки, правый приток р. Москвы [5]	Поступление в породы с осадками	0,88		1,37	1,44	1,00	4,87	6,73
	Вынос грунтовыми водами	0,80		1,88	9,74	1,10	1,87	34,6
	Отношение выноса к поступлению	0,91		1,37	6,76	1,10	0,38	5,13
Бассейн р. Судомы, левый приток р. Шелони [10]	Поступление в породы с осадками	0,45	0,16	0,08	0,16	0,33	1,47	0,90
	Вынос грунтовыми водами	0,40	0,11	1,13	5,66	0,25	0,55	21,9
	Отношение выноса к поступлению	0,89	0,69	14,1	35,4	0,76	0,37	24,4
Южная Эстония [6]	Поступление в породы с осадками	0,72	0,38	0,33	1,59	1,26	1,93	4,75
	Вынос грунтовыми водами	0,57	0,24	1,58	6,25	0,95	1,33	26,5
	Отношение выноса к поступлению	0,79	0,63	4,77	3,93	0,75	0,69	5,57

Таблица 2

Средний химический состав атмосферных осадков и грунтовых вод

Территория	Ионы, *мг/л* *						
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Бассейн р. Медвенки [5]	1,9 / 6 2		2,9 / 14,7	3,0 / 76,4	2,1 / 8,7	9,9 / 14,7	14,2 / 272
Бассейн р. Судомы [4, 10]	1,1 / 3,5	0,4 / 1,0	0,2 / 9,9	0,4 / 49,7	0,8 / 2,2	3,6 / 4,8	2,2 / 192
Южная Эстония [6]	1,7 / 6,0	0,9 / 2,5	0,8 / 16,7	3,7 / 66,0	3,0 / 10,0	4,6 / 14,0	11,2 / 280

* В числителе — в атмосферных осадках, в знаменателе — в грунтовых водах.

площадей в центральных и северо-западных областях СССР. Каждая из рассматриваемых территорий имеет свои специфические физико-географические и геологические особенности, накладывающие отпечаток на химический состав атмосферных и грунтовых вод (табл. 2). Например, для осадков бассейна р. Медвенки характерно повышенное содержание сульфат-иона, что объясняется близостью крупного промышленного центра — г. Москвы. Довольно высокое содержание гидрокарбонатных солей в осадках бассейна р. Медвенки и в Южной Эстонии может быть связано с цементными заводами. Наиболее «чистые» осадки — в бассейне р. Судомы. Вынос ионов грунтовыми водами рассчитывался, исходя из предположения, что в грунтовые воды попадают все соли, содержащиеся в атмосферных осадках (кроме солей в склоновом стоке); средний состав и сток грунтовых вод определялся по составу и величине стока малых рек в период межени [13]. При такой методике подсчета не учитывается смыв солей склоновыми водами. Фактически же склоновые воды в паводки смывают соли, накопившиеся за лето и зиму на поверхности водосбора в результате жизнедеятельности и гниения растений, испарения, выветривания. Поэтому полученные результаты лишь качественно характеризуют некоторые характерные особенности поступления и выноса хлоридных, сульфатных и карбонатных солей (без претензии на полный солевой баланс).

В склоновых водах хлоридных солей содержится приблизительно столько же, сколько в атмосферных осадках, гидрокарбонатных — несколько больше, но во много раз меньше, чем в грунтовых водах, а сульфатных — значительно больше по сравнению с атмосферными осадками [2]. Рассмотрев, данные табл. 1, можно отметить следующие особенности миграции солей.

1. Количество хлоридных солей, поступающих с атмосферными осадками в рассматриваемых районах, полностью обеспечит их содержание в грунтовых водах. Учитывая низкие содержания хлоридных солей в склоновых водах, можно констатировать, что вынос хлоридов при денудационной деятельности, как правило, незначителен.

2. С атмосферными осадками на водосборы попадает бо́льшее количество сульфатных солей, чем выносится с грунтовым стоком. Остальная часть их ассимилируется растениями и затем смывается в паводки склоновыми водами с продуктами гниения растений. Это явление хорошо согласуется с закономерностями режима химического состава склоновых и поверхностных вод этих же районов [2]: содержание сульфат-иона

в этих водах в паводки, как правило, не уменьшается вследствие разбавления, а наоборот, увеличивается или остается близким к меженному при относительном уменьшении содержания других анионов. Подобная закономерность характерна и для грунтовых вод [9, 10]. Часть сульфатов восстанавливается до сероводорода в анаэробных условиях болот и заболоченных почв.

Таким образом, источником значительной части сульфатных солей служат атмосферные осадки, но режим их поступления в реки совсем иной, чем хлоридных солей. Кажущийся дефицит сульфатов в поверхностных водах компенсируется склоновым стоком.

3. Количество бикарбонатных солей кальция и магния, которые выносятся из толщи пород водосбора, во много раз превышает привнесенное атмосферными осадками. В этом процессе существенную роль играют растения, выделяющие при дыхании и гниении углекислый газ, расходуемый на перевод плохо растворимых карбонатов в биокарбонаты. Концентрации углекислого газа в воздухе явно малы для получения приведенных в табл. 2 величин содержания бикарбонатов в грунтовых водах. Интенсивность этого процесса может быть различной и определяется, в первую очередь, геологическим строением и геоморфологическими особенностями водосборов. Однако и для территорий, где отсутствуют коренные карбонатные породы (например, бóльшая часть Карелии и Кольского п-ва), вынос бикарбонатов грунтовыми водами из коры выветривания и почвенного покрова превышает их привнос с атмосферными осадками. Таким образом, часть энергии, накапливающейся в растениях при фотосинтезе и питании, расходуется на химическую эрозию водосборов, выражающуюся прежде всего в разрушении карбонатов. Роль атмосферных осадков в привносе бикарбонатов ничтожна.

Подсчеты, произведенные нами для ряда других бассейнов северо-западных областей, подтверждают те же закономерности. Общий характер полученных закономерностей в какой-то мере подчеркивается и тем, что результаты для Южной Эстонии суммируют данные по многим малым рекам.

Отмеченные особенности миграции солей в гумидных областях можно проиллюстрировать на материалах Японии — территории с совершенно иными физико-географическими и геологическими условиями (табл. 3).

Таблица 3

Средний состав вод представительных рек Японии и роль различных источников элементов в формировании этого состава [16]

Источник поступления	Содержание, *мг/л*					
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	S
Атмосферные осадки	1,3	0,31	0,42	1,1	1,4	1,8
Сухие осадки	2,3	0,55	0,74	1,9	2,47	3,2
Индустриальные продукты	0,29	0,81	0	0,31	0,90	0,32
Термальные и минеральные источники	0,22	0,012	0,016	0,066	0,37	0,17
Всего поступает	4,11	1,68	1,18	3,38	5,14	5,49
Средний состав речных вод (вынос)	5,1	1,0	2,4	6,3	5,2	3,5
Отношение выноса к поступлению	1,24	0,60	2,03	1,86	1,01	0,64

Обилие осадков (1000—3000 *мм в год*) создает по всей площади страны избыточное увлажнение [17]. При расчетах баланса учитывалась специфика японских условий — густая заселенность, требующая специального учета индустриальных продуктов, и активная вулканическая деятельность, с которой связаны многочисленные термальные и минеральные источники. Из табл. 3 видно, что для Японии получены качественно те же результаты: при количестве поступающих с осадками хлоридных солей, (условно принято равным выносимому реками), сульфатов * поступает больше, чем выносится (не учтены паводки). Наблюдается вынос солей кальция и магния за счет выщелачивания карбонатов, но, в связи с особенностями геологического строения Японии, он менее интенсивен, чем на северо-западе СССР. Таким образом, качественная оценка солевого баланса некоторых территорий с хорошо выраженным гумидным климатом дает сходные результаты.

Из циклического характера миграции хлоридных и сульфатных солей не следует, однако, делать вывода о «стерильности» пород в отношении сульфатов и хлоридов в зоне циркуляции грунтовых вод. Данные по водным вытяжкам (табл. 4) показывают, что эти соли в породах имеются,

Таблица 4

Химический состав водных вытяжек из пород зоны свободного водообмена в северо-западных областях СССР (Ленинградской и Новгородской)

Порода	Содержание в 1 *л* дистиллированной воды на 100 *г* породы, *мг*					
	$Na^+ + K^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Супесь, lg $lQ_{III}vd$	5,2	5,0	13,6	11,0	4,0	58,0
Валунный суглинок, $glQ_{III}vd$	6,2	4,7	10,6	6,0	4,0	58,0
Песок мелкозернистый, $fglQ_{III}$	6,8	0,5	3,2	6,2	7,4	12,2
То же, $fglQ_{II}$	7,3	1,3	3,0	4,4	12,4	18,4
Суглинок валунный, glQ_{II}	11,2	3,1	6,0	5,3	32,7	29,5
Песчаник, D_2st	10,5	1,8	8,0	8,0	8,6	30,5
Известняк, D_2sv	7,4	2,7	14,0	7,5	5,8	48,8
Песок, D_2st	9,2	1,2	7,0	9,7	3,7	24,4

причем их содержание в несколько десятков раз превышает содержание, отвечающее влажности полного насыщения и химическому составу грунтовых вод. Эти остаточные соли не растворяются при существующих скоростях движения грунтовых вод и агрегатном состоянии пород. С изменением этих условий нарушается равновесие, и соли переходят в раствор. На отдельных закарстованных водосборах с высокими модулями подземного стока вынос сульфатных и хлоридных солей из пород водосбора может существенно превышать их поступление с атмосферными осадками. Примером могут служить подсчеты для бассейна р. Систы (Силурийское плато под Ленинградом) и данные А. А. Колодяжной [7] для карстового источника на юго-западном склоне Кавказа (табл. 5). В обоих случаях наблюдается интенсивный вынос хлоридных и сульфатных солей из пород водосбора, однако отмеченные соотношения выносимых грунтовыми водами количеств хлоридов, сульфатов и гидрокарбонатов с привносимыми атмосферными осадками сохраняются, т. е. здесь наблюдается два процесса: циклическая миграция хлоридных и сульфатных солей с ее специфическими

* Даны в форме элементарной серы [16].

Таблица 5

Поступление солей с атмосферными осадками и вынос грунтовыми водами для некоторых закарстованных водосборов

Территория	Статьи баланса	Ионы, *т/год* на 1 *км*²					
		$Na^+ + K^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Бассейн р. Систы (Силурийское плато под Ленинградом) [10]	Поступление с осадками	0,55	0,07	0,14	0,29	1,31	0,80
	Вынос грунтовыми водами	0,73	4,23	10,2	0,74	1,68	48,2
	Отношение выноса к поступлению	1,33	60,5	72,8	2,55	1,28	60,3
Водосбор карстового источника (юго-западный склон Кавказа) [7]	Поступление с осадками	—	0,11	0,27	0,12	0,62	—
	Вынос источником	—	0,35	13,73	1,31	0,99	—
	Отношение выноса к поступлению	—	3,18	50,8	10,9	1,60	—

особенностями и интенсивное выщелачивание карбонатных, хлоридных и сульфатных солей, связанное с усилением водообмена.

Для участков разгрузки глубоких артезианских вод повышенной минерализации или сложенных гипсоносными, соленосными породами и некоторыми разновидностями магматических пород рассматриваемые процессы миграции солей затушевываются засолонением грунтовых и поверхностных вод артезианскими [8] или растворением пород [1, 10, 12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Аветисян В. А. К вопросу о формировании вод андезито-базальтовых лав Армении. В сб. «Вопросы геологии и гидрогеологии Армянской ССР». АН АрмССР, 1956.
2. Воронков П. П. Основные черты формирования режима ионного состава поверхностных вод в условиях Севера. Тр. ГГИ, вып. 33 (87), 1951.
3. Грабовский Р. И. Атмосферные ядра конденсации. Гидрометеоиздат, 1956.
4. Дроздова В. М. и др. Химический состав атмосферных осадков на Европейской территории СССР. Гидрометеоиздат, 1964.
5. Зверев В. П. К вопросу о роли химического состава атмосферных осадков в формировании грунтовых вод басс. р. Медвенки. Тр. лаборатории гидрогеол. проблем, т. 45, 1962.
6. Каризе В. Основные черты формирования состава вод четвертичных отложений Южной Эстонии. Изв. АН ЭССР, сер. физ.-мат. и техн. наук, вып. 4, 1966.
7. Колодяжная А. А. Карст флишевой формации юго-западного склона Кавказа. Наука, 1965.
8. Коротков А. И. Некоторые особенности формирования химического состава поверхностных вод Приильменской низины. Изв. ВУЗов. Геология и разведка, № 12, 1963.
9. Коротков А. И. К вопросу об особенностях режима химического состава грунтовых вод Северо-Запада. Мат. по геологии и полезным ископаемым Северо-Запада РСФСР, вып. 5, 1966.
10. Коротков А. И. Некоторые особенности годового режима серы в грунтовых водах гумидных областей. *Материалы V совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока.* Иркутск—Тюмень, 1967.
11. Коссович П. С. О круговороте серы и хлора на земном шаре и о значении этого процесса в природе, почве и культуре сельскохозяйственных растений. Сообщ. из Бюро по земледелию и почвоведению Ученого комитета главн. упр. землеустр. и земледелия. XII. СПб, 1913.
12. Куцева П. П., Коновалов Г. С., Петросянц Б. А. Источники поступления хлор-ионов в воду некоторых рек Северного Кавказа. В сб. «Гидрохимические материалы», т. XLVI, Гидрометеоиздат, 1968.
13. Макаренко Ф. А. О гидрохимическом районировании грунтовых вод по химическому составу малых рек. ДАН СССР, т. 74, № 3, 1950.
14. Перельман А. И. Геохимия ландшафтов. Высшая школа, 1966.
15. Пивоваров Я. Я. К вопросу об аэральном происхождении солей в почвах. Почвоведение, т. 8, № 1—4, 1906.
16. Сугавара К. Миграция элементов в гидросфере и атмосфере. В сб. «Химия земной коры», Наука, 1964.
17. Треварта Г. *Япония. Физическая и экономическая география.* Изд-во иностр. лит-ры, 1949.