

**ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ  
ПОЧВ**

УДК 631.4+631.6

**СОЛЕНАКОПЛЕНИЕ НА РАВНИНАХ СРЕДНЕЙ АЗИИ  
И ПУТИ ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ\***

© 2007 г. **И. П. Айдаров<sup>1</sup>, Е. И. Панкова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Московский государственный университет природообустройства, 127550, Москва, ул. Прянишникова, 19*

<sup>2</sup> *Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7*

Поступила в редакцию 14.07.2006 г.

Рассмотрен водно-солевой баланс равнин Средней Азии в природных условиях и при активном антропогенном вмешательстве в результате развития орошения, строительства гидротехнических и гидромелиоративных систем. Установлено, что на территории равнин Средней Азии со стороны горного обрамления ежегодно поступает до 87.2 млн. т солей. В природных условиях значительная часть солей сбрасывалась в Аральское море, озера Балхаш и Иссык-Куль, а также в глубокие замкнутые депрессии (Гузкане, Саракамыш и др.). Эти соли в значительной части выводились из геохимического оборота. Только 40% солей поступало в отложения и грунтовые воды среднеазиатских равнин. Развитие орошения изменило водно-солевой баланс территории. Возросло (на 30%) поступление солей в воды и почвы, что привело к активизации процессов засоления в регионе. Предложен комплекс мероприятий по регулированию и замедлению процессов засоления. Для этого необходимо в первую очередь прекратить сброс коллекторно-дренажных вод в реки, не использовать минерализованные воды для орошения, провести реконструкцию существующих оросительных систем, сократить площади орошения.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одной из основных проблем орошаемого земледелия в бассейне Аральского моря, начиная с конца XIX в. и по настоящее время, является засоление орошаемых земель. Площади засоления орошаемых земель, несмотря на применяемую систему мелиоративных мероприятий, включающих промывки, промывной режим орошения и дренаж, не только не снижаются, но во многих случаях даже возрастают (табл. 1) [12, 16, 24].

Сведения, приведенные в табл. 1, показывают, что засоление орошаемых земель в Туркменистане прогрессирует. В Киргизии и Таджикистане процессы соленакопления к концу XX в. стабилизировались, и даже наметилась тенденция некоторого снижения площадей засоленных земель. Однако прогрессивного рассоления в этих регионах не происходит, также как и в Узбекистане.

Приведенные факты говорят о том, что применяемые до 1989 г. в Средней Азии системы мелиоративных мероприятий по предупреждению и борьбе с засолением орошаемых земель в целом не эффективны. Для выяснения причин этого необходимо рассмотреть как особенности техники и технологии орошения земель отдельных массивов в регионе, так и региональные гидрогеологические и геохимические процессы, определяющие состояние Среднеазиатской-Туранской равнины в целом.

В данной работе мы попытались осветить некоторые вопросы формирования регионального геохимического баланса Туранской равнины, пути его регулирования в естественных условиях и при развитии орошения. Методологической основой работы послужили представления о природном объекте как об открытой системе, существование которой обусловлено обменом вещества и энергии с окружающей средой.

**ОБЪЕКТ И РЕЗУЛЬТАТЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Рассматриваемая территория представляет собой бессточную область площадью около 158 млн. га. Орографически рассматриваемая территория подразделяется на 2 крупные части: горные массивы (25% площади или 39.5 млн. га) и Туранскую равнину (118.5 млн. га). Горная часть является зоной формирования региональных водных и геохимических потоков. Она подвержена активным тектоническим поднятиям. Туранская равнина, напротив, представляет собой зону тектонических погружений. Бессточные низменности, речные долины и дельты являются зоной разгрузки водных и геохимических потоков, т.е. зоной аккумуляции водорастворимых солей и речных наносов. Между этими двумя регионами расположена полоса подгорных равнин (конусов выноса и сухих дельт), сложенных пролювиальными и делювиальными отложениями. Верхние части конусов выноса сложены галечниками, сменяющимися в

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 04-04-48197, 07-04-00136.

нижних частях глинистыми отложениями. При таком геолого-литологическом строении подземные воды в верхних и средних частях конусов выноса выклиниваются на поверхность в виде родников (сазовая зона), а в нижней части, уже в пределах Туранской равнины, приобретают напорность [3, 14, 19].

Вся эта литолого-гидрогеологическая система связана между собой потоками воды и солей и представляет единую в гидрогеологическом и геохимическом отношении систему, водный и солевой баланс которой можно описать уравнениями:

$$\Delta W = O_c + \Pi - E, \quad (1)$$

$$\Delta G = G_{Oc} + G_n, \quad (2)$$

где  $\Delta W$  и  $\Delta G$  – изменение запасов влаги и солей в толще до регионального водоупора, м<sup>3</sup>/год, т;  $O_c$  и  $G_{Oc}$  – атмосферные осадки и поступление солей с осадками, м<sup>3</sup>/год, т;  $\Pi$  и  $G_n$  – поверхностный и подземный приток воды и солей со стороны горной части воды, м<sup>3</sup>/год, т/год;  $E$  – испарение, м<sup>3</sup>/год. В уравнениях (1), (2) отсутствует поверхностный и подземный отток воды и солей, что определяется бессточностью Туранской равнины в целом.

Поступление воды и солей на территорию Туранской равнины с атмосферными осадками определяется достаточно просто по данным метеорологических станций и составляет

$$O_c = O_c^p \omega = 290,$$

где  $O_c$  – атмосферные осадки, выпадающие на Туранскую равнину, км<sup>3</sup> в год;  $O_c^p$  – средняя величина атмосферных осадков, равная 245 мм или 2450 м<sup>3</sup>/га в год;  $\omega$  – площадь Туранской равнины ( $\omega = 158 \times 0.75 = 118.5$  млн. га).

Поступление солей с атмосферными осадками составит

$$G_{Oc} = 290 \times 0.025 = 7.2 \text{ млн. т в год}$$

(здесь 290 км<sup>3</sup>/год – количество атмосферных осадков на территории Туранской равнины, 0.025 г/л – минерализация атмосферных осадков в естественных условиях [9]).

Гораздо сложнее оценить величины поверхностного притока воды ( $\Pi$ ), подземного поступления солей с водой ( $G_n$ ) и испарения ( $E$ ). Для оценки этих величин в работе использована связь водного и энергетического балансов и данные метеорологических и геохимических исследований [7, 9, 10].

Величина испарения ( $E$ ) для горной территории определяется из выражения [7, 13, 17, 21]:

$$E = O_c^r \sqrt{\bar{R} th \frac{1}{R} (1 - ch \bar{R} + sh \bar{R})}, \quad (3)$$

**Таблица 1.** Площадь засоленных почв в процентах от площади орошаемых земель

Республика	Годы				
	1982	1983	1984	1985	1989
Туркменистан,	85.0	87.6	86.7	85.0	89.0
в том числе					
слабозасоленные	45.2	42.9	46.2	37.1	37.6
среднезасоленные	26.2	29.6	25.9	30.9	38.7
сильнозасоленные	13.6	15.1	14.6	17.0	12.7
Узбекистан,	52.8	55.9	53.0	52.0	51.4
в том числе					
слабозасоленные	35.0	37.8	30.3	30.6	31.3
среднезасоленные	14.1	14.6	17.7	16.2	14.4
сильнозасоленные	3.7	3.5	5.0	5.2	5.7
Таджикистан,	26.1	18.5	23.9	17.6	15.4
в том числе					
слабозасоленные	17.6	12.6	16.4	12.0	10.0
среднезасоленные	4.6	3.2	4.1	3.1	4.2
сильнозасоленные	3.9	2.6	3.4	2.5	1.2
Киргизстан,	13.8	9.6	12.7	14.1	11.5
в том числе					
слабозасоленные	7.1	5.0	7.2	7.9	6.5
среднезасоленные	4.0	2.7	3.7	4.3	3.5
сильнозасоленные	2.7	1.5	1.8	1.9	1.5

а величина поверхностного и подземного стока для этой же горной территории оценивается как

$$\Pi = O_c^r - E, \quad (4)$$

здесь  $O_c^r$  – среднее значение суммы атмосферных осадков, равное для горной части 940 мм или 94 см,

$$\bar{R} = \frac{R^r}{L(O_c^r)} = \frac{168}{2.51 \times 94} = 0.71, \quad (5)$$

где  $\bar{R}$  – “индекс сухости” Будыко [7],  $R^r$  – величина радиационного баланса, ( $R^r = 168$  кДж/см<sup>2</sup> в год);  $L$  – скрытая теплота парообразования ( $L = 2.51$  кДж/см<sup>3</sup>);  $th$ ,  $ch$ ,  $sh$  – специальные функции. Тогда величина испарения составит  $E = 940 \sqrt{0.71 \times 0.89(1 - 1.26 + 0.77)} = 536$  мм, а величина притока  $\Pi = 940 - 536 = 404$  мм или 4040 м<sup>3</sup>/га в год.

Общий поверхностный и подземный приток со стороны гор будет равен:  $\Pi = 4040 \omega_r = 4040 \times 39500000 = 160$  км<sup>3</sup>/в год (здесь  $\omega_r$  – площадь горной части 158–118.5 = 39.5 млн. га), а общий геохимический сток  $G_n = \Pi C_n = 160$  км<sup>3</sup>/год  $\times 0.5$  г/л = 80 млн. т в год.

Величина испарения для Туранской равнины в естественных условиях складывается из испарения с водной поверхности ( $E_b$ ), замыкающих элементов речных систем (Аральское море, озер Балхаш и Иссык-Куль); испарения с поверхности почв, характеризуемых гидроморфным режимом (уровень грунтовых вод  $< 2$  м) ( $E_r$ ), и земель с автоморфным и полугидроморфным режимами (уровень грунтовых вод  $> 2$  м) ( $E_a$ ).

$$\sum E = E_b + E_r + E_a, \quad (6)$$

$$E_b = \omega_1 E_1 + \omega_2 E_2 + \omega_3 E_3, \quad (7)$$

где  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – площади акваторий Аральского моря, озер Балхаш и Иссык-Куль,  $E_1, E_2$  и  $E_3$  – испарение с учетом водной растительности [1, 11, 14, 18, 21].

$$E_a = 6.6 \times 10500 + 1.8 \times 10500 + 0.62 \times 5580 = 92 \text{ км}^3 \text{ в год}$$

( $\omega_1 - 6.6$  млн. га;  $\omega_2 - 1.8$  млн. га;  $\omega_3 - 0.62$  млн. га;  $E_1 = E_2 = 10500$ ;  $E_3 = 5580 \text{ м}^3/\text{га}$ ),

$$E_r = 11.0 \times 10500 = 116 \text{ км}^3 \text{ в год,}$$

(11.0 – площадь земель с уровнем грунтовых вод  $< 2$  м, млн. га).

Величину  $E_a$  определим, используя выражение (3) при  $R = 4,0$ ,

$$E_3 = 245 \sqrt{4 \times 0.245(1 - 27.31 + 27.29)} = 240 \text{ мм}$$

или  $2400 \text{ м}^3/\text{га}$ , тогда  $E_a$  составит

$$E_a = 2400\omega_4 = 2400 \times 98.5 = 236 \text{ км}^3 \text{ в год,}$$

( $\omega_4 = 118.5 - 6.6 - 1.8 - 0.62 - 11.0 = 98.5$  млн. га).

Тогда  $\sum E = E_d + E_r + E_a = 92 + 116 + 236 = 444 \text{ км}^3$  в год.

Подставляя полученные величины в уравнение водного баланса (1), получили

$$\Delta W = O_c + P - E = 290 + 160 - 444 = 6 \text{ км}^3 \text{ в год.}$$

Учитывая, что в многолетнем плане величина  $\Delta W = 0$ , водный баланс сводится с достаточной точностью, величина невязки составляет  $\sigma = \frac{6}{290 + 160} 100 = 1.3\%$  от суммы приходных статей баланса.

Геохимический (солевой) баланс Туранской равнины складывается иначе.

$$\Delta G = G_{Oc} + G_n = 7.2 + 80 = 87.2 \text{ млн. т в год.}$$

Этот вывод не нов, процесс активного соленакопления в пределах Туранской равнины отмечался и ранее [9, 10, 15 и др.]. Однако гораздо важнее оценить не просто приход, а дальнейшую судьбу поступивших солей. Используя материалы гидрологических и геохимических исследований [3, 9, 10, 17, 19], рассмотрим судьбу солей, посту-

пивших в пределы Туранской равнины. Поверхностный сток в замыкающие элементы речных систем (Аральское море, озера Балхаш и Иссык-Куль) в естественных условиях составлял  $80 \text{ км}^3$  в год (остальной поверхностный сток рассеивался в среднем и нижнем течении рек). При минерализации речных вод  $C = 0.5$  г/л общий геохимический сток равен  $80 \times 0.5 = 40$  млн. т в год. Характерной особенностью указанных водоемов является постоянство минерализации их вод [5, 6, 9, 10, 16, 19, 21]. Следовательно, практически весь геохимический сток, ежегодно поступающий в указанные водоемы, усваивался водными экосистемами этих водоемов и полностью выводился из активного геохимического оборота. Кроме того, в естественных условиях сток рек Чу, Талас, Асса и др. почти полностью поступал в низовья, где формировались обширные разливы. Эти разливы круглогодично наполнялись речным стоком и отличались богатейшими водными и околородными экосистемами, усваивавшими весь геохимический сток. Объем этого стока равен  $4 \text{ км}^3 \times 0.5 \text{ г/л} = 2$  млн. т в год [19]. Но и это еще не все, около 10 млн. т поступало ежегодно в замкнутые понижения и депрессии (Арнасай, Тузкане, Сары-Камыш и др.) и тоже выводилось из активного геохимического оборота [9, 10, 19].

Таким образом, из общего геохимического притока ( $87.2$  млн. т в год) только  $35$  млн. т в год или  $40\%$  от первоначального стока ( $87.2 - 40 - 2 - 10 = 35.2$  млн. т в год) поступало в отложения и грунтовые воды Туранской равнины, остальные  $60\%$  из геохимического оборота просто выводились и на процессы соленакопления в почвах и грунтах не оказывали влияния.

Приведенные материалы позволяют критически оценить представления ряда специалистов, высказанные в разные годы XX в., о роли Аральского моря в природе региона среднеазиатских равнин и о рациональном использовании водных и земельных ресурсов его бассейна. Известный климатолог Воейков в 1908 г. писал: ... «В отдаленном будущем, при желательных успехах гидротехнического дела и сельского хозяйства мы должны воспользоваться всей водой бассейна Арала в маловодные годы для искусственного орошения. Озеро должно служить для стока излишней воды “многоводных годов”» [8]. На первый взгляд эти рекомендации кажутся вполне обоснованными, но только на первый взгляд. Анализ многолетних рядов по стоку Амударьи и Сырдарьи показал, что если использовать для орошения весь сток маловодных лет (обеспеченностью  $80\%$ ), то в Аральское море, с учетом потерь стока в среднем и нижнем течении рек, поступит не более  $20 \text{ км}^3$  в год, а это означает, что отметки уровня воды в море снизятся на  $10-15$  м, а площадь акватории сократится на  $75-80\%$ ! Если же учесть, что продолжительность серии мало-

водных лет может достигать 3–4 лет, то гибель Аральского моря будет неизбежна.

Не менее спорным было и мнение геологов, географов и почвоведов (А.Л. Яншина, И.П. Герасимова, С.В. Зонна, Д.Л. Арманда). В капитальном труде “Средняя Азия” [22] они писали: “... Аральское море и прилегающие дельты испаряют примерно 60 км<sup>3</sup>/год, которые пополняются главным образом двумя реками и в малой степени осадками и подземными водами. А это испарение – бесполезная потеря. Искусственное понижение Аральского моря или его исчезновение как озера привело бы к осушению огромных болотных массивов в дельте Амударьи и Сырдарьи, к понижению уровня грунтовых вод, а следовательно, к улучшению мелиоративной обстановки. Эти земельные массивы могли бы быть частично вовлечены в сельскохозяйственное использование”!

Каковы же в действительности последствия широкого развития орошения в бассейне Аральского моря, и почему ранее не столь остро стоявшая проблема засоления орошаемых земель стала в настоящее время для рассматриваемого региона одной из основных? Прежде, чем говорить о влиянии орошения на геохимическую обстановку, рассмотрим опыт орошения земель в бассейне Аральского моря в период до присоединения Туркестана к России, т.е. до начала XX в.

Орошаемые земли в бассейне Аральского моря до присоединения Туркестана к России были сосредоточены в основном в пределах предгорных зон и конусов выноса (Ферганская и Вахшская долины, предгорья Копет-Дага), а также в речных долинах в среднем и нижнем течении Амударьи и Сырдарьи, в пределах сухих дельт (Зеравшан, Теджен, Мургаб и др.). Такое размещение орошаемых земель было обусловлено рядом причин, основными из которых были: 1) наличие пресных водных ресурсов и возможность самотечного забора воды на орошение из родников и рек; 2) благоприятные агроклиматические условия этих территорий при наличии незасоленных плодородных почв и возможность использования на орошение пресных грунтовых вод. Особенности геоморфологических, гидрогеологических и геохимических условий рассматриваемых территорий определяли технические схемы и конструкцию оросительных систем. В целом, существовавшие в то время оросительные системы обладали высоким уровнем организации и технологичности и обеспечивали не только эффективное использование водных и земельных ресурсов, надежное регулирование водного и солевого режимов и балансов орошаемых земель, но и сохранение экологического равновесия в пределах орошаемых земель и окружающих их территорий.

Конструктивно оросительные системы на территории подгорных равнин в сазовой зоне пред-

ставляли собой системы естественных водотоков глубиной 1–1.5 м, которые одновременно выполняли роль и оросительной и дренажной сети. Вода на поля подавалась при помощи примитивных дренажных устройств (чигири и др.). Такая конструкция оросительных систем обеспечивала сохранение естественного гидроморфного режима и возможность использования растениями пресных грунтовых вод. Сохранение естественного гидроморфного режима не приводило к изменению величины притока и оттока подземных вод, а испарение влаги сельскохозяйственными растениями было примерно равно испарению естественной растительности. Таким образом, водный баланс орошаемых земель на данных территориях по сравнению с естественными условиями практически не менялся. Также обстояло дело и с солевым балансом орошаемых земель. Минерализация вод подземного притока и оттока в естественных условиях и при орошении была на этих массивах постоянной (0.5 г/л), что при сумме атмосферных осадков 350 мм/год исключало развитие процессов вторичного засоления почв на орошаемых землях подгорных равнин.

Несколько иная конструкция оросительных систем была в пределах речных долин и дельт. Водозабор осуществлялся самотечно из рек, а распределение воды по площади – системой искусственных земляных каналов глубиной ~1.5 м. Подача воды на поля производилась также с помощью чигирей. Сохранение естественного гидроморфного режима, как и в предыдущем случае, обеспечивало стабильность притока фильтрационных вод со стороны реки и оттока их за пределы орошаемых массивов, это определяло и стабильность минерализации грунтовых вод (0.5–0.6 г/л). Пресные поливные воды и мощная толща опресненных аллювиальных отложений исключали развитие процессов засоления орошаемых земель на аллювиальных равнинах.

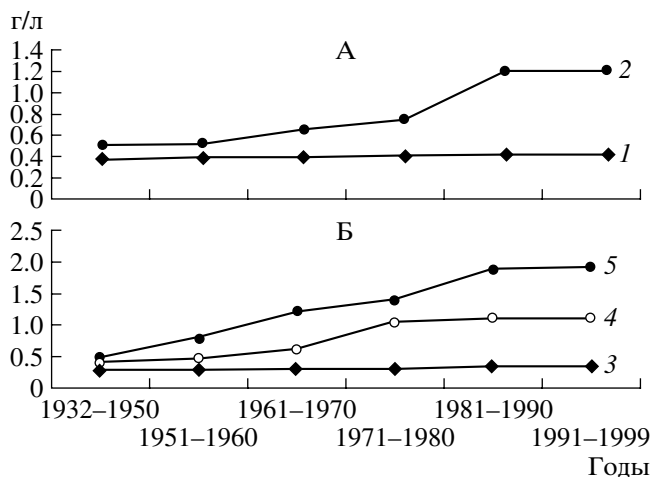
Приведенные материалы свидетельствуют, что опыта орошения засоленных или подверженных активному засолению земель, в бассейне Аральского моря в то время практически не было. Развитие орошения земель, подверженных засолению, началось после присоединения Туркестана к России и продолжалось вплоть до 1990 г. Оно часто осуществлялось без учета региональных экологических и геохимических условий и без учета воздействия мелиоративного и водохозяйственного строительства на окружающую среду.

Что же в результате произошло? Не останавливаясь на анализе изменений экологических и геохимических процессов, рассмотрим общую ситуацию, сложившуюся на территории Туранской равнины к 1990 г. К этому времени ввод новых орошаемых земель практически прекратил-

ся, а гидрогеологическая обстановка на орошаемых землях более или менее стабилизировалась [17]. В 1990 г. площади орошаемых земель составляли около 8 млн. га, водозабор на орошение – 105 км<sup>3</sup> в год, в результате чего приток к замыкающим элементам основных речных систем (Аральское море, озера Балхаш и Иссык-Куль) сократился с 80 до 22.5 км<sup>3</sup> в год [5, 10, 11, 16, 19, 21, 23]. Снижение притока в эти крупные водоемы привело к развитию ряда негативных экологических, гидрогеологических и геохимических процессов как в самих водоемах, так и в природной системе в целом.

Уменьшение притока в Аральское море с 63 до 9.6 км<sup>3</sup> в год привело к понижению его уровня на 18–20 м, сокращению площади акватории с 66 до 25 тыс. км<sup>2</sup> и разрушению водных и околоводных экосистем и, как следствие, резкому увеличению минерализации морских вод с 10–12 до 29 г/л [24]. В результате этого Аральское море утратило роль регулятора климата и геохимических потоков в регионе. Климат Приаралья стал более континентальным, а сумма активных температур снизилась на 400–500°С, что ухудшило условия сельскохозяйственного производства, особенно в Каракалпакии [18]. Разрушение водных экосистем моря привело к тому, что из регулятора (поглотителя) геохимических потоков оно стало источником засоления земель в результате атмосферного солепереноса с осушенного дна. Минерализация атмосферных осадков в равнинной части бассейна Аральского моря увеличилась с 0.025 до 0.065 г/л [9]. Количество солей, поступающих в результате атмосферного солепереноса, в современных условиях составляет  $O_p C_{Oc} = 290 \times 0.065 = 18.8$  млн. т в год. Озера Балхаш и Иссык-Куль пострадали гораздо меньше; приток к ним сократился с 15 до 10 км<sup>3</sup> в год и с 3.9 до 2.9 км<sup>3</sup> в год, а площади акватории с 18 до 16 тыс. км<sup>2</sup> и с 6.2 до 5.7 тыс. км<sup>2</sup> соответственно [11, 19, 21]. Водные экосистемы этих озер практически сохранились, также как их роль в регулировании геохимических процессов.

Понижение уровня Аральского моря и изменение в связи с этим базиса эрозии вызвало резкое усиление русловых процессов и падение уровня воды в среднем и, особенно, в нижнем течении рек Амударья и Сырдарья. Реки из источников питания аллювиальных отложений и грунтовых вод речных долин превратились в естественные дренажи со всеми вытекающими отсюда последствиями. Изменение направления подземного потока коренным образом нарушило исторически сложившиеся гидрогеологические и геохимические условия речных долин и, в первую очередь, привело к уменьшению зоны опресненных аллювиальных отложений и увеличению минерализации грунтовых вод в пределах аллювиальных рав-



Изменение минерализации воды в реках Амударья (А) и Сырдарья (Б) (по [www.fao.org/ag/agl/swl/wpr/reports/y\\_nr/z\\_nz/uzch312.htm](http://www.fao.org/ag/agl/swl/wpr/reports/y_nr/z_nz/uzch312.htm)): 1 – створ Вахш-Пяндж; 2 – створ Саманбай; 3 – створ Нарын-Карадарья; 4 – створ Кишлак-Кали; 5 – створ Сырдарья-Казалинск.

нин. Это в свою очередь привело к ранее отсутствующей проблеме – засолению орошаемых земель в долинах рек. Кроме того, снижение горизонтов воды в реках потребовало реконструкции самотечных водозаборов и существующих ранее оросительных систем.

Превращение рек Сырдарья и Амударья в естественные дренажи изменило условия формирования гидрохимического режима самих рек. В естественных условиях минерализация речных вод формировалась (увеличивалась) только до выхода рек на равнину и далее оставалась практически постоянной до устья. В современных же условиях минерализация речных вод формируется (увеличивается) на всем их протяжении в результате поступления в реки минерализованных подземных вод (рисунок). Увеличению минерализации речных вод в значительной степени способствовал также и сброс в реки большого количества минерализованных коллекторно-дренажных вод. Из их общего объема, достигающего 35 км<sup>3</sup> в год, 51% сбрасывается непосредственно в реки, 16% повторно используется для орошения земель и 33% поступает в депрессии (Сарыкамыш, Арнасай и др.) [23, 24].

Широкое развитие орошения на территории Туранской равнины изменило водный и геохимический режимы и балансы как самих орошаемых земель, так и примыкающих территорий. Водный режим почв изменился в результате орошения и подъема уровня грунтовых вод. На орошаемых землях автоморфные почвы перешли в категорию полугидроморфных и гидроморфных. Ликвидации разливов в низовьях рек Чу, Талас и др. также привели к изменению гидрогеологических

Таблица 2. Геохимический (солевой) баланс зоны аэрации орошаемых земель\*

Массив орошения	$G_{Op}$	$G_{Oc}$	$\Sigma G$	$D$	$\alpha$	$\alpha D$	$\Delta G$	Изменение площадей засоленных орошаемых земель за период с 1970–85 по 1990 г., %
	т/га					т/га		
Голодная степь (старая зона)	18.0	0.2	18.2	22.0	0.8	17.6	+0.6	1985 –17%, 1990 –29% [23]
Голодная степь (новая зона)	19.2	0.2	19.4	29.3	0.6	17.6	+1.8	1970 –26%, 1990 –54% [23]
Хорезмский оазис	19.8	0.3	20.1	16.9	0.8	13.5	+6.6	1970 –22%, 1990 –44% [23]
Каракалпакия	21.0	0.4	21.4	24.4	0.8	19.5	+1.9	1970 –39%, 1990 –58% [23]
Ташаузский оазис	21.2	0.4	21.6	23.7	0.8	19.0	+2.6	1970 –40%, 1990 –60% [23, 24]
Ферганская долина	15.2	0	15.2	18.0	0.7	12.6	+2.6	1985 –22%, 1990 –53% [23, 24]
Каршинская степь	14.8	0	14.8	21.0	0.7	14.7	+0.1	1980 –10%, 1990 –21% [13]
Вахшская долина	7.5	0	7.5	19.0	0.4	7.6	–0.1	1985–17.6%, 1990–15.4% [14]
Чуйская долина	2.6	0	2.6	8.5	0.4	3.4	–0.8	1985–14.1%, 1990–11.5% [14]
Бухарский оазис	1.9	0	1.9	3.1	0.4	1.2	+0.7	1970 –26%, 1990 –27% [23, 24]

\* Обозначения см. в тексте.

условий. Однако изменение водного режима в пределах рассматриваемых территорий не повлекло за собой изменение водного баланса бессточной Туранской равнины в целом. Приходные статьи водного баланса ( $G_c$  и  $P$ ) остались неизменными так же, как и расходная статья ( $E$ ). Увеличение испарения с орошаемых земель и поверхности водохранилищ практически полностью компенсируется уменьшением испарения с акватории крупных водоемов и площади ликвидированных разливов в низовьях рек.

Иначе обстоит дело с геохимическим режимом и балансом солей. Обе составляющие геохимического баланса ( $G_{Oc}$  и  $G_n$ ) в связи с развитием орошения изменились. Орошение земель в верховьях рек Амударья и Сырдарья (Ферганской и Вахшской долинах) привело к усилению геохимических потоков в результате выщелачивания солей и поступления их с подземными и коллекторно-дренажными водами обратно в реки. Это увеличение по сравнению с естественными условиями составляет 30%.

Таким образом, вынос солей с горной части на равнину составил в современных условиях  $80 \times 1.3 = 104$  млн. т в год (80 млн. т в год – общий геохимический сток со стороны гор в природных условиях; 1.3 – увеличение выноса солей в реки в результате притока дренажных вод). Увеличилось и поступление солей с атмосферными осадками с 7.2 до 18.8 млн. т в год. Общий сток солей на равнинную часть территории увеличился с 87.2 до 122.8 (104 + 18.8) млн. т в год или в 1.4 раза, что естественно отразилось на геохимическом режиме региона и в первую очередь на орошаемых землях. Поясним это конкретными цифрами. По данным [24], в Аральское море в современных условиях поступает 12.5, в оз. Балхаш – 5.8 и

оз. Иссык-Куль – 0.9 млн.т солей в год, что в сумме составляет около 19 млн. т в год. В бессточные депрессии Арнасай, Сарыкамыш и др. поступает 33 % общего дренажного стока или  $35 \times 0.33 - 5 = 58$  млн. т солей в год, где  $35 \text{ км}^3$  – общий объем дренажного стока; 0.33 – доля дренажного стока в понижения Арнасай и Сарыкамыш и др.; 5 г/л – минерализация дренажных вод). Следовательно, в толщу отложений и грунтовые воды поступает  $122.8 - 19 - 58 = 45.8$  млн. т солей в год, что на 30% больше, чем в естественных условиях (35.2 млн. т). Основная часть поступающих солей приходится на орошаемые земли. Для подтверждения этого вывода рассмотрим геохимический (солевой) баланс зоны аэрации (3 м) орошаемых земель на основных массивах орошения. Уравнение геохимического (солевого) баланса в этом случае можно представить в виде:

$$\Delta G_n = G_{Oc} + G_{Op} - D\alpha, \quad (8)$$

где  $\Delta G_n$  – изменение запасов солей в зоне аэрации, т/га в год;  $G_{Oc}$  – поступление солей с атмосферными осадками, т/га в год;  $G_{Op}$  – поступление солей с оросительной водой, т/га в год;  $D$  – общий вынос солей с дренажными водами, т/га в год;  $\alpha$  – доля солей, поступивших в дренажные воды из зоны аэрации. Значение коэффициента  $\alpha$  определяется параметрами дренажа и особенностями гидрогеологических условий и по данным теоретических и экспериментальных исследований составляет 0.4–0.8 [2, 3]. Обобщение многочисленных данных по величинам оросительных норм, параметрам дренажа, объему дренажного стока, минерализации оросительных и дренажных вод и расчеты геохимического (солевого) баланса зоны аэрации на орошаемых землях приведены в табл. 2. Они осно-

ваны на обобщении публикаций разных лет [2–4, 12–14, 17, 18, 23, 24].

Приведенные данные показывают, что отрицательный геохимический (солевой) баланс на орошаемых землях в 1990 г. наблюдался только в Чуйской и Вахшской долинах. Этот вывод подтверждается данными наблюдений за засолением орошаемых земель. На всех остальных массивах орошения солевой баланс положительный, что свидетельствует о процессе современного соленакопления. Площади засоленных орошаемых земель за период с 1970–1985 гг. по 1990 г. на этих массивах, по данным наблюдений, увеличились в 1.1–2.5 раза.

Как же выйти из сложившегося тяжелого положения? Анализ региональных процессов соленакопления показал, что для улучшения общей ситуации необходимо изменить условия формирования геохимического баланса как региона в целом, так и орошаемых земель. Однако коренным образом изменить региональный геохимический баланс практически невозможно без изменения состояния Аральского моря и снижения интенсивности геохимических потоков в верховьях рек Амударья и Сырдарья.

Рассчитывать на увеличение притока воды к Аральскому морю, площади его акватории и восстановление водных экосистем в обозримой перспективе нет оснований, поэтому нельзя рассчитывать и на уменьшение поступления солей с атмосферными осадками (атмосферный солеперенос). Речь может идти лишь о некотором уменьшении интенсивности геохимического притока со стороны гор за счет реконструкции существующих оросительных систем в верховьях основных рек (Ферганская и Вахшская долины и долины рек Зеравшан, Сурхандарья, Кафирниган, Кашкадарья и др.). Основная цель реконструкции существующих оросительных систем – снижение поступления минерализованных возвратных вод за счет совершенствования техники и технологии орошения.

Повышение коэффициента полезного действия (КПД) системы каналов и техники полива до 0.85–0.9 и  $\geq 0.95$  сможет обеспечить уменьшение объемов минерализованных возвратных вод в 1.5–2 раза по сравнению с современными условиями. Вместе с тем, необходимо иметь в виду, что эффект от реконструкции в смысле снижения минерализации речных вод в месте выхода рек на равнину скажется не сразу, а после стабилизации гидрогеологической обстановки. Время стабилизации подземных потоков можно оценить, используя выражение [1, 2],

$$\tau = \frac{\delta L^2}{km}, \quad (9)$$

где  $\tau$  – время стабилизации гидрогеологических условий после реконструкции, сут;  $\delta$  – коэффициент водоотдачи водоносных отложений;  $L$  – среднее расстояние до реки, м;  $k$  и  $m$  – коэффициент фильтрации и мощность водоносных отложений, м/сут и м. При средних значениях  $\delta = 0.07$ ,  $L = 20000$  м,  $k = 10$  м/сут,  $m = 200$  м, получим

$$\tau = \frac{0.07 \times 20000^2}{10 \times 200} = 14000 \text{ сут или } 38 \text{ лет.}$$

И несмотря на это и на огромные затраты, реконструкция существующих оросительных систем как в верховьях рек, так и в целом в регионе необходима. Вопрос заключается лишь в обосновании очередности реализации тех или иных мероприятий, связанных с реконструкцией существующих оросительных систем. При обосновании очередности реализации мероприятий по реконструкции существующих оросительных систем приоритетным (первоочередным) является улучшение почвенно-мелиоративного состояния орошаемых земель и сведение к минимуму (или исключение) засоления почв. К числу таких мероприятий относится полное исключение сброса минерализованных коллекторно-дренажных вод в реки и повторного использования этих вод для орошения земель. Это мероприятие должно быть в первую очередь реализовано на орошаемых землях среднего и нижнего течения рек Амударьи и Сырдарьи, где из общего объема коллекторно-дренажных вод ( $35 \text{ км}^3$ ) в настоящее время только 33% сбрасываются в депрессии Сарыкамыш, Арнасай и др. Остальные 67% (или  $23 \text{ км}^3$ ) поступают в реки и используются на орошение. Реализация этого мероприятия позволит изменить геохимический (солевой) баланс орошаемых земель

$$122.8 - 19 - 54 - 35 \times 0.67 \times 4 = -44 \text{ млн. т в год.}$$

Коллекторно-дренажные воды необходимо сбрасывать в Аральское море или в депрессии, либо использовать в пустынях Кызылкумы и Каракумы для увлажнения естественных биоценозов.

Исключение сброса минерализованных коллекторно-дренажных вод в реки хотя и снизит минерализацию речных вод, но не до естественного состояния. Дело в том, что если в естественных условиях реки питали аллювиальные отложения и их минерализация оставалась постоянной до устья, то в современных условиях они превратились в дрены. Несложные расчеты показывают, что приток подземных вод в реки Амударья и Сырдарья может составить  $0.5\text{--}0.6 \text{ км}^3$  в год, а минерализация речных вод в устье при сохранении существующего расхода –  $0.8\text{--}1$  г/л.

Оценим, как изменится солевой баланс по основным массивам орошаемых земель в слое 3 м после реализации указанного мероприятия. Снижение минерализации оросительных вод дает

возможность уменьшить величины оросительных норм нетто и объем дренажного стока. Сокращение величин оросительных норм нетто можно оценить, используя выражение [1, 2]

$$\bar{O}_p = \frac{O_p}{E - O_c} = \frac{1}{1 - \bar{C}_n} \left( \frac{\bar{C}_n - 1}{\Delta} + 1 \right), \quad (10)$$

здесь  $O_p$  – оросительная норма нетто, м<sup>3</sup>/га;  $(E - O_c)$  – дефицит водного баланса, м<sup>3</sup>/га;  $\bar{C}_n = \frac{C_n}{C_\delta}$ ;  $\bar{C}_r = \frac{C_r}{C_\delta}$ ;  $\Delta = \frac{\lambda}{\lambda m}$ ;  $C_n$  и  $C_r$  – минерализация оросительных и грунтовых вод, г/л;  $C_\delta$  – допустимая минерализация почвенного раствора, г/л;  $\Delta$  – глубина залегания грунтовых вод, м;  $\lambda$  – коэффициент гидродинамической дисперсии, м;  $m$  – пористость почв, в долях от объема.

Уменьшение объема выноса солей пропорционально снижению нагрузки на дренаж.

$$\bar{D}_p = \frac{D_{p_1}}{D_{p_0}} - \frac{(100 - \text{КИВ}_1) \bar{O}_{p_1}}{(100 - \text{КИВ}_0) \bar{O}_{p_0}}, \quad (11)$$

где  $\bar{D}_p$  – уменьшение выноса солей с дренажем, в долях от исходного; КИВ – коэффициент использования воды, КИВ = КПД<sub>с</sub> × КПД<sub>т</sub>; КПД<sub>с</sub> и КПД<sub>т</sub> – коэффициенты полезного действия системы каналов и техники полива, %;  $\bar{O}_{p_0}$  и  $\bar{O}_{p_1}$  – величины оросительных норм нетто (см. выражение 10).

Расчет геохимического (солевого) баланса орошаемых земель выполним при следующих усредненных данных:  $C_n = 1$  г/л;  $C_r = 10$  г/л;  $C_\delta = 6$  г/л;  $\Delta = 3$  м;  $\lambda = 0.5$  м;  $m = 0.5$ ; КПД<sub>с</sub> = 0.6; КПД<sub>т</sub> определяется как  $1 - O_p$ . Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Для крупных массивов орошения, где ожидать в ближайшей перспективе снижения минерализации поливных вод нет основания, необходима реконструкция оросительных систем с доведением КПД<sub>с</sub> до 0.85–0.9, КПД<sub>т</sub> ≥ 0.95 и КИВ до 0.81–0.86. К таким объектам относятся, в первую очередь, Ферганская и Вахшская долины и долины рек Сурхандарья, Кашкадарья, Кафирнигана и др. Такая очередность реконструкции существующих оросительных систем обусловлена, во-первых, необходимостью снижения минерализации речных вод и интенсивности геохимических потоков и, во-вторых, улучшением мелиоративной обстановки.

Расчеты показывают, что реализация этих мероприятий позволит замедлить и отчасти предотвратить процесс соленакопления в почвах орошаемых земель.

Наряду с реконструкцией существующих оросительных систем указанных объектов целесооб-

**Таблица 3.** Геохимический (солевой) баланс трехметрового слоя орошаемых земель\*

Показатели	Голодная степь (старая зона)	Хорезмская область	Гашаузская область	Каракалпакия
Снижение оросительных норм нетто**	0.90	0.90	0.90	0.92
Снижение минерализации поливных вод**	0.68	0.83	0.77	0.71
Поступление солей с поливной водой, т/га	11.0	14.8	14.7	13.7
Отвод солей дренажем из 3 м слоя, т/га	11.9	15.2	17.1	17.9
Геохимический (солевой) баланс, т/га	-0.9	-0.4	-2.4	-4.2

\* Расчеты выполнены для орошаемых массивов, где реально может быть снижена минерализация поливных вод.

\*\* Показатели даны в долях от существующих.

разно увеличить использование не связанных с речным стоком пресных подземных вод за счет отбора их в верхних частях подгорных равнин и конусов выноса. Объем этих подземных вод не превысит 5–7 км<sup>3</sup> в год, что позволит уменьшить геохимический сток ~ на 2–3 млн. т в год. Использовать эти воды для орошения земель не целесообразно, так как они по сути являются резервом пресных вод для водоснабжения населения.

Наиболее сложной является проблема улучшения геохимического (солевого) баланса для таких крупных массивов орошения как Голодная, Джизакская и Каршинская степи, Бухарский оазис. На этих массивах потребуются не только реконструкция существующих оросительных систем и совершенствование техники и технологии орошения, но и сокращение площадей орошения.

В результате реализации всех указанных мероприятий объем водопотребления орошаемого земледелия может быть сокращен на 30–35%, т.е. на 30–35 км<sup>3</sup> в год.

## ВЫВОДЫ

1. Применяемая система мелиоративных мероприятий по предупреждению и борьбе с засолением на орошаемых землях на территории Средней Азии в бассейне Аральского моря в целом оказалась не эффективной.

2. Основные причины ухудшения почвенно-мелиоративных условий и прежде всего широкое раз-



витие и активизация засоления орошаемых почв связаны с недостаточным учетом региональных геохимических процессов и роли Аральского моря как замыкающего элемента основных речных систем в регулировании солевого баланса региона в целом и орошаемых земель в частности.

3. Анализ особенностей формирования геохимического (солевого) баланса региона и орошаемых земель позволил сформулировать основные мероприятия направленные на регулирование процессов соленакопления, обеспечивающие сведение к минимуму (или предотвращение) засоления орошаемых земель. Эти мероприятия включают: 1) прекращение сброса коллекторно-дренажных вод в реки; 2) исключение повторного использования этих вод для орошения; 3) реконструкцию существующих оросительных систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянов С.Ф.* Борьба с засолением орошаемых земель. М.: Колос, 1987. С. 3–80.
2. *Аверьянов С.Ф.* Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод. М.: Колос, 1982. С. 19–69.
3. *Айдаров И.П.* Регулирование водно-солевого и питательного режимов орошаемых земель. М.: Агропромиздат, 1985. С. 42–234.
4. *Айдаров И.П., Голованов А.И., Никольский Ю.Н.* Оптимизация мелиоративных режимов орошаемых и осушаемых сельскохозяйственных земель. М.: Агропромиздат, 1990. 58 с.
5. *Асарин А.Е.* Применение искусственных рядов притока и испарения для расчета ожидаемых уровней замкнутых водоемов // Гидротехническое строительство. № 8. 1972. С. 10–11.
6. *Блинов Л.К.* Гидрохимия Аральского моря. Л.: Гидрометиздат, 1956. 252 с.
7. *Будыко М.И.* Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 316 с.
8. *Воейков А.И.* Орошение Закаспийской области с точки зрения географии и климатологии. СПб, 1908. 110 с.
9. *Глазовский Н.Ф.* Аральский кризис. М.: Наука, 1990. С. 3–50
10. *Глазовский Н.Ф.* Современное соленакопление в аридных областях. М.: Наука, 1987. С. 192.
11. *Гронская Т.П.* Обзор исследований водного баланса, термического и гидрохимического режима оз. Иссык-Куль. Л., 1980. С. 6–9.
12. Кадастры мелиоративного состояния орошаемых и осушаемых земель. М.: МВХ, 1982–1998. 130 с.
13. *Каримов Э.К.* Улучшение эколого-мелиоративного состояния и повышение продуктивности сельскохозяйственных земель Узбекистана. М.: МСХА, 1994. С. 50–104.
14. *Кац Д.М., Шестаков В.М.* Мелиоративная гидрогеология. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1981. С. 45–143.
15. *Ковда В.А., Егоров В.В., Морозов А.Т., Лебедев Ю.П.* Закономерности процесса соленакопления в пустынях Арало-Каспийской низменности // Тр. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева АН СССР. 1954. Т. 44. С. 5–78.
16. *Коренистов Д.В., Критский Р.Н., Менкель М.Ф., Шимельшиц И.Я.* Проблемы Аральского моря // Водные ресурсы. № 1. 1992. С. 138–162.
17. *Панкова Е.И., Айдаров И.П., Ямнова И.А., Новикова А.Ф., Благоволонин Н.С.* Природное и антропогенное засоление почв Аральского моря (география, генезис, эволюция). М., 1996. С. 7–148.
18. Разработка мероприятий по рациональному использованию орошаемых земель в бассейне Аральского моря. Отчет НИС МГМИ, 1990 (рукопись). С. 41–136.
19. *Раткович Д.Я.* Гидрологические основы водобеспечения. М.: Изд-во РАН, 1993. С. 320–368.
20. *Решеткина Н.М., Барон В.А., Якубов Х.* Вертикальный дренаж. М.: Колос, 1961. С. 13–85.
21. *Соколов А.А., Циценко К.В.* Гидрологические и водохозяйственные аспекты Или-Балхашской проблемы // Тр. V Всесоюзного гидрологического съезда. Т. 4. Л.: Гидрометиздат, 1989. С. 300–308.
22. Средняя Азия / Под ред. И.П. Герасимова. М.: Наука, 1968. С. 10–11.
23. Aral Sea Basin. World Bank Program. 3.1. B. Improvement of Agricultural Water Quality, 1995. P. 50.
24. Gateway to land and water information. Tashkent, Uzbekistan, 1999. P. 75.

## Salt Accumulation and Its Control on the Plains of Central Asia

I. P. Aidarov and E. I. Pankova

The water-salt budget on the plains of Central Asia in natural conditions and under significant anthropogenic impact (irrigation and construction of hydraulic engineering systems) is analyzed. It is shown that up to 87.2 million tons of salts are annually transported to the plains of Central Asia from the surrounding mountains. Under natural conditions, the larger part of the salts was discharged into the Aral Sea, Balkhash and Issyk-Kul lakes, and into deep closed depressions (Tuzkan, Sarykamysh, and others). Thus, these salts were generally excluded from the geochemical turnover. Only 40% of the salts entered the deposits and groundwater of the plains. Irrigation has transformed the water-salt budget in the area. The input of salts into the groundwater and soils increased by 30% and induced the development of soil salinization in the region. Measures for salinization control are suggested. It is necessary to stop the discharge of drainage water into the rivers and the use of saline water for irrigation purposes. The existing irrigation systems should be reconstructed, and the irrigated areas should be reduced.