

ПРОГНОЗ ЗАСОЛЕНИЯ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ

Территория изучаемого района расположена в Шуском районе в северо-восточной части Жамбылской области. Здесь протекает три реки: Шу, Аксу, Курагаты, воды которых используются для орошения сельскохозяйственных культур и водопоя животных. На реке Шу построено Тасоткельское водохранилище, являющееся основным источником орошения земель района. Тасоткельский массив орошения занимает центральную часть междуречья рек Шу, Курагаты, правобережную часть надпойменной террасы р. Шу и часть предгорной равнины. Площадь орошаемых земель массива составляет 30340 га.

Влияние орошения на гидрохимический режим грунтовых вод может быть довольно заметным, что обусловлено в первую очередь изменением водного режима пород зоны аэрации. Как правило, орошение является причиной увеличения инфильтрационного питания грунтовых вод, которое интенсифицирует процессы выщелачивания солей из зоны аэрации, и в зонах с недостаточной естественной дренированностью, приводит к подъему грунтовых вод.

Прогноз гидрохимического режима базируется на результатах прогноза уровня режима грунтовых вод для расчетного периода времени. В зависимости от изученности района он может проводиться балансовым или аналитическим методом. В работе рассматривается методика прогнозирования засоления земель под влиянием орошения предложенная В.А.Бароном

Балансовым методом прогнозируется суммарное изменение засоления почв и пород всей зоны аэрации и расчетного слоя грунтовых вод под влиянием известного комплекса приходных и расходных режимобразующих факторов.

Качественные и количественные изменения содержания солей, в отдельных горизонтах изучаемой толщи пород, прогнозируются с помощью аналитических методов. Аналитические методы основаны на использовании решений уравнения водно-солевого баланса, записанного в дифференциальной форме, для конкретных расчетных схем. В общем виде гидрохимический режим грунтовых или поровых вод, формирующийся под влиянием процессов диффузии, сорбции (десорбции) и фильтрационного потока в водовмещающей толще пород, представленной однородной системой пор, описывается следующим дифференциальным уравнением в частных производных:

$$n_0 \frac{\partial C_i}{\partial t} = D^*_{i0} \Delta C_i + D_{T,i} \frac{\Delta T'}{T'} - \text{div}(C_i \vec{v}) - \frac{\partial N_{i0}}{\partial t} - \frac{\partial N_{i0}^*}{\partial t} - \alpha(C_i - C'_i), \quad (1)$$

где C_i и N_{i0} - соответственно объемная концентрация i -го компонента комбинации солей в составе подвижной фазы и неподвижной фазы (сорбента) в расчете на единицу объема пористой среды;

N^*_{i0} - содержание i -го компонента солей в емкости обмена;

D^*_{i0} - коэффициент конвективной диффузии t -го компонента солей; $D_{T,i}$ - коэффициент термодиффузии;

Δ - оператор Лапласа; $\vec{v}$ - векторная скорость потока внутри пористой среды;

T' - абсолютная температура по Кельвину.

Уравнение (1), называемое уравнением конвективной диффузии, определяет баланс i -го компонента смеси солей в потоке подземных вод. Для того чтобы определить баланс солей всей смеси из компонентов, необходимо рассмотреть совместно систему уравнений вида (1), составленных отдельно для каждого компонента.

Для решения этой системы ее целесообразно упростить, используя следующие положения.

На староорошаемых землях типы химического состава грунтовых вод устойчивы во времени. Даже в условиях интенсивного орошения при хорошей дренированности территории тип химического состава грунтовых вод меняется только через 10-15 лет. Поэтому в староорошаемых районах при прогнозах гидрохимического режима почвогрунтов и грунтовых вод можно рассматривать только общую минерализацию грунтовых вод или поровых растворов зоны аэрации.

В новоорошаемых районах, когда в расчетный период времени возможно изменение химического состава фильтрационного потока, вместо отдельных компонентов солей целесообразно рассматривать суммарную токсичность солей C^* . Поэтому при проведении расчетов солевого режима поровых или грунтовых вод, формирующихся под влиянием работы гидромелиоративных систем, можно использовать соответствующие решения одного уравнения (1), в котором под C_i должна пониматься минерализация поровых или грунтовых вод или суммарная токсичность солей (поэтому ниже везде вместо C_i употребляется C).

Анализ потоков солей в породах, вызванных конвективной диффузией и термодиффузией, показывает, что эффект последней следует учитывать только в тех случаях, когда температурные градиенты окажутся на четыре-пять порядков больше градиентов концентрации вещества. Поэтому, не накладывая ограничений на термодинамику процессов, при прогнозах гидрохимического режима подземных вод практически во всех случаях в уравнении (1)

можно пренебречь членом $D_{T,i} \frac{\Delta T}{T}$. Кроме того

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial C}{\partial t} \quad \text{и} \quad \frac{\partial N^*}{\partial t} = \frac{1}{\gamma^*} \frac{\partial C}{\partial t},$$

и поэтому для практических расчетов прогноза гидрохимического режима грунтовых вод можно ограничиться решениями следующего дифференциального уравнения:

$$n_s \frac{\partial C}{\partial t} = D^* \Delta C - \operatorname{div}(C \vec{v}) - \alpha(C - C'). \quad (2)$$

В случае одномерного потока фильтрации из (2) получаем:

$$n_s \frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \alpha(C - C'), \quad (3)$$

где $n_s = n_0 + \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma^*}$ - коэффициент эффективной пористости.

Подчеркнем, что, используя метод недеформируемых линий тока, с помощью уравнения (3) можно прогнозировать гидрохимический режим грунтовых вод в двух- и трехмерных областях фильтрации.

Прогноз изменения суммы солей в расчетной толще пород по солевому балансу. Приходные статьи: поступление солей с атмосферными осадками (S_{oc}); поступление солей с оросительной водой (S_{op}); поступление солей с подземным притоком ($S_{пр}$); поступление солей в грунтовые воды в результате растворения их в породах зоны аэрации S_p .

Расходные статьи: вынос солей из грунтовых вод при испарении и транспирации ($S_{исп}$); вынос солей с дренажным стоком ($S_{др}$); вынос солей подземным оттоком ($S_{от}$); выпадение солей в твердую фазу при переходе отдельных ионов в поглощающий комплекс ($S_{в.т}$).

Солевой баланс может рассматриваться отдельно для поверхностных вод, почвенного слоя, почв и пород зоны аэрации, грунтовых вод и всей расчетной толщи активного водо-солеобмена. При гидрогеологических исследованиях целесообразно изучать только последние три.

В общем виде уравнение солевого баланса может быть представлено следующим образом:

$$S_k - S_n = S_{op} + S_{oc} - S_{др} \pm \Delta S_n, \quad (4)$$

где ΔS_n - разница между подземным притоком и оттоком солей по пласту и в зону аэрации,

$\Delta S_n = S_{пр} - (S_{от} - S_{исп})$ (если рассматривается баланс грунтовых вод) или $\Delta S = S_{исп} - S_{op}$

- разница между выносом солей из зоны аэрации в грунтовые воды и поступлением их в зону аэрации из грунтовых вод (если изучается баланс солей зоны аэрации);

S_n и S_k - соответственно запасы солей в начальный и конечный моменты времени расчетного периода.

Как правило, при составлении солевых балансов процессами сорбции (десорбции) и выносом солей растениями можно пренебречь.

Составляющие уравнения (4) S_k и S_n определяются путем опробования пород и грунтовых вод, S_{op} ; S_{oc} ; $S_{др}$ - путем непосредственного измерения минерализации осадков, оросительной воды и дренажного стока. Причем

$$S_{\text{ор}} = q_{\text{ор}} \cdot C_{\text{ор}}; \quad S_{\text{др}} = q_{\text{др}} \cdot C_{\text{др}}; \quad S_{\text{ос}} = q_{\text{ос}} \cdot C_{\text{ос}},$$

где $q_{\text{ор}}$, $q_{\text{ос}}$, $q_{\text{др}}$, $C_{\text{ос}}$, $C_{\text{ор}}$, $C_{\text{др}}$ - соответственно количества оросительной воды, осадков и дренажного стока, приходящиеся на единицу балансовой площади, и их минерализация.

Минерализация подземного притока и оттока определяется путем химического анализа проб воды из пьезометрической сети.

$$S_{\text{исп}} = (q_{\text{ос}} + q_{\text{ор}} - \text{И} - q_{\text{др}})C,$$

где И - испарение с поверхности грунтовых вод и транспирация;

$q_{\text{ор}} + q_{\text{ос}} - q_{\text{др}}$ - разница между подземным притоком и оттоком грунтовых вод;

$C = C_{\text{г}}$ - минерализация грунтовых вод при $q_{\text{ос}} + q_{\text{ор}} < \text{И} + q_{\text{др}}$;

$C = C_{\text{п}}$ - минерализация порового раствора при $q_{\text{ос}} + q_{\text{ор}} > \text{И} + q_{\text{др}}$.

Для ориентировочных расчетов можно принять $C_{\text{г}} = C_{\text{п}}$, а для более точных следует определять C путем непосредственного отбора поровых вод на химический анализ или постановкой опытных промывок с последующим пересчетом количества вымытых солей с единицы промываемой площади каждым кубометром воды.

В условиях недостаточной естественной и искусственной дренированности, когда превышение осадков и оросительных вод над суммарным испарением приводит к подъему уровня грунтовых вод, минерализацию последних можно определить по одной из следующих формул:

$$C = \frac{S_{\text{исп}} + (q_{\text{ос}} + q_{\text{ор}})}{q_{\text{ос}} + q_{\text{ор}} - \text{И} - q_{\text{др}}}, \quad \text{г/дм}^3, \quad (5)$$

$$C = \frac{S_{\text{исп}} + 10(q_{\text{ос}} + q_{\text{ор}})x'S\delta}{q_{\text{ос}} + q_{\text{ор}} - \text{И} - q_{\text{др}}}, \quad \text{г/дм}^3, \quad (6)$$

где S - исходная засоленность пород в зоне подъема уровня грунтовых вод, %;

x' - коэффициент, учитывающий, какая часть солей перейдет из твердой фазы в раствор при насыщении породы водой. Определяется он путем сопоставления результатов химических анализов водной вытяжки и порового раствора, проведенных для одной и той же породы.

Прогноз минерализации верхних слоев грунтовых вод в период их многолетнего подъема производится исходя из анализа процессов промачивания неполностью насыщенных пород, из чего следует, что подъем грунтовых вод в орошаемых районах обусловлен как инфильтрацией оросительной воды и атмосферных осадков, так и вытеснением из зоны аэрации почвенного раствора. Поэтому при подъеме уровня грунтовых вод средняя минерализация слоя воды, обусловленная инфильтрацией, может быть найдена по следующей формуле:

$$C = \frac{h_0 C_0 + h_{\text{п}} C_{\text{п}}}{h}, \quad (7)$$

где h - высота подъема уровня грунтовых вод за время t , определяемая слоем инфильтрационной воды h_0 и слоем вытесненной из зоны аэрации естественной влаги $h_{\text{п}}$;

C_0 и $C_{\text{п}}$ - соответственно минерализация оросительной воды и отпрессованного порового раствора из зоны аэрации.

Слой воды, образовавшийся за счет вытесненной естественной влаги ($h_{\text{п}}$), может быть найден из формулы

$$h_{\text{п}} \approx \frac{W - (10 \div 15)\%}{n} h_0, \quad (8)$$

где W и n - соответственно естественная влажность и пористость пород зоны аэрации.

(Приведенные формулы применимы для прогноза минерализации легкорастворимых солей в зоне аэрации.).

Минерализация верхних слоев грунтовых вод в принципе может оказаться несколько меньше средней минерализации всего слоя. В процессе движения влаги через зону аэрации последняя опресняется, и поэтому нижние слои инфильтрационного бугра грунтовых вод окажутся более минерализованными, чем верхние. Для уточнения послойной минерализации грунтовых вод в процессе их подъема следует с помощью формулы (7) просчитать минерализацию

формирующегося бугра грунтовых вод для каждого года периода подъема. А для определения C_n в течение этих лет можно воспользоваться следующей формулой:

$$C_{nj} = \frac{(W - W')^j C_n \{ (W - W') [1 - (W - W')^{j-1}] + W' \} C_0}{W}, \quad (9)$$

где C_{nj} - минерализация порового раствора на i -тый год подъема уровня грунтовых вод;
 C_n - минерализация порового раствора в первый год орошения;
 W' - влажность, равная 10-15%;
 W - естественная влажность зоны аэрации;
 C_0 - минерализация оросительной воды.

В условиях сравнительной стабилизации грунтовых вод направление процесса формирования солевого режима определяется главным образом испарением поливной воды и атмосферных осадков при весьма незначительном оттоке солей из верхних слоев грунтовых вод в глубь водоносного горизонта.

Для расчета годового прироста солей в поровых растворах зоны аэрации и в верхнем слое грунтовых вод используем следующую формулу:

$$\Delta M = \frac{C_{op} N_{op} + C_{oc} N_{oc}}{(h \delta W + 0,5 A \delta n_n) 1000}, \quad (10)$$

где ΔM - прирост за год минерализации грунтовых вод или порового раствора зоны аэрации, г/дм³;
 M_{op} - минерализация оросительных вод, г/дм³;
 M_{oc} - то же, осадков, г/дм³;
 N - оросительная норма, м³/га;
 N_{oc} - годовое количество осадков,
 h - мощность зоны аэрации, м;
 δ - объемный вес грунта, г/см³;
 W_a - средневзвешенная весовая влажность в зоне аэрации;
 A - среднегодовая амплитуда колебания уровня грунтовых вод, м;
 n_n - пористость в зоне насыщения, в долях единицы.

Для определения прироста засоленности почвогрунтов в процентном содержании солей используется та же формула в соответствующих обозначениях:

$$\Delta C = \frac{M_{op} N + M_{oc} N_{oc}}{\delta \left(h + \frac{1}{2} A \right) \cdot 100}, \quad (11)$$

где ΔC - прирост содержания солей в процентном выражении.

В основу прогноза засоления земель Тасоткельского массива положены данные, полученные путем полевых и лабораторных исследований, проведенных в 2006 году Жетысуской гидрогеолого - мелиоративной экспедицией.

Расчет водного и солевого баланса производится для двух участков: I-ый, Правобережье р. Шу – 19722 га, II-ой, – Левобережье р. Шу – 6871 га.

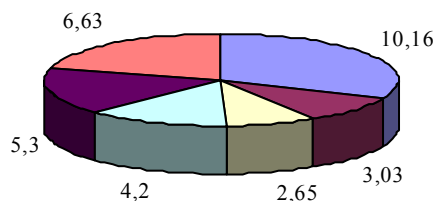
Результаты расчета составляющих водного баланса приведены в табл. 1 и рис. 1.

Таблица 1. **Водный баланс Тасоткельского массива за вегетационный период 2006 г., млн. м³**

№ пп	Составляющие баланса	I участок	II участок	Итого
Приходные статьи баланса				
1	Водоподача	44,30	32,93	77,23
2	Атмосферные осадки	1,97	0,68	2,65
3	Приток подземных вод	2,97	2,33	5,30
Итого:		49,24	35,94	85,18

Расходные статьи баланса

1	Суммарное испарение	8,07	2,09	10,16
2	Дренажный сток	4,01	0,19	4,20
3	Отток подземных вод	4,33	2,30	6,63
4	Аккумуляция влаги в зоне аэрации	2,60	0,43	3,03
Итого:		19,01	5,01	24,02
Расчет:		+30,23	+30,93	+61,16



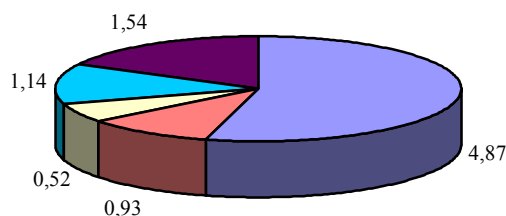
■ суммарное испарение ■ аккумуляция влаги ■ атмосферные осадки
■ дренажный сток ■ приток подземных вод ■ отток подземных вод

Рис. 1. Составляющие водного баланса орошаемых земель Тасоткельского массива орошения за 2006 г., млн. м³

Связь солевого баланса с водным обусловлена тем, что перемещение солей происходит в виде водно-солевых растворов. Рассчитывается по формуле (11). Результаты расчета составляющих солевого баланса приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2. Солевой баланс Тасоткельского массива за вегетационный период 2006 г., тыс. т.

Составляющие баланса		I участок	II участок	Итого
Приход				
1	Поступление солей с оросительной водой	2,75	2,12	4,87
2	Поступление солей с атмосферными осадками	0,39	0,13	0,52
3	Поступление солей с подземными водами	0,30	0,63	0,93
Итого:		3,44	2,88	6,32
Составляющие баланса		I участок	II участок	Итого
Расход				
1	Вынос солей с дренажным стоком	0,94	0,60	1,54
2	Вынос солей с подземными водами	0,52	0,62	1,14
Итого:		1,46	1,22	2,63
Расчет		+1,98	+1,66	+3,64



■ поступление солей с оросительной водой ■ поступление солей с подзем
■ поступление солей с атмосферными осадками ■ вынос солей с подземными
■ вынос солей с дренажными водами

Рис. 2. Составляющие солевого баланса орошаемых земель Тасоткельского массива орошения за 2006 г., тыс. т.

Для расчета прироста солей в зоне аэрации используются формулы (10,11). Средняя минерализация оросительных вод: для I-го участка: 0,59 г/дм³, для II-го участка: 0,72 г/дм³, средняя минерализация атмосферных осадков: для I-го участка: 0,068 г/дм³, для II-го участка:

0,068 г/ дм³ , поливные нормы: для I-го участка: 1200 м³/га, 3400 м³/га, 5000 м³/га, для II-го участка: 1200 м³/га, 3400 м³/га, 5000 м³/га, годовое количество осадков: для I-го участка-270,5 м³/га, для II-го участка: 270,5 м³/га, средняя мощность зоны аэрации: для I-го участка: 3,7 м, для II-го участка: 4,9 м. Объемный вес грунта: для I-го участка: 1,34 г/см³, для II-го участка: 1,52 г/см³. Средневзвешенная влажность в зоне аэрации: для I-го участка: 0,23, для II-го участка: 0,19. Пористость в зоне насыщения для I-го участка: 0,45, для II-го участка: 0,41

Результаты расчета годового накопления солей и увеличение минерализации приведены в табл.

3

Таблица 3. Годовое накопление солей в почвогрунтах зоны аэрации и увеличение минерализации верхнего слоя грунтовых вод в зависимости от глубины залегания УГВ и поливных норм

№ участка	Глубина до воды, м	Амплитуда колебаний УГВ, м	Поливные нормы, м ³ /га	Накопление солей в почвогрунтах в зоне аэрации за год, %	Увеличение минерализации верхнего слоя грунтовых вод за год, г/л
I	1	0,41	1200	0,006	0,23
			3400	0,014	0,38
			5000	0,0221	0,53
	3	0,63	1200	0,0017	0,15
			3400	0,0024	0,28
			5000	0,0035	0,36
	5	0,81	1200	0,0007	0,08
			3400	0,0013	0,16
			5000	0,0026	0,41
II	1	0,41	1200	0,008	0,22
			3400	0,013	0,36
			5000	0,022	0,51
	3	0,63	1200	0,0012	0,18
			3400	0,0018	0,29
			5000	0,0030	0,32
	5	0,81	1200	0,0009	0,09
			3400	0,0015	0,12
			5000	0,0024	0,27

Приведенные прогнозные значения ежегодного прироста засоленности грунтовых вод и почвогрунтов зоны аэрации в сочетании с исходными величинами засоления позволяют осуществлять долгосрочные прогнозы на любой период. На рисунках 3 и 4 отражены соответственно среднее увеличение минерализации верхнего слоя грунтовых вод и накопление солей в почвогрунтах зоны аэрации на 2007, 2011, 2016 годы.

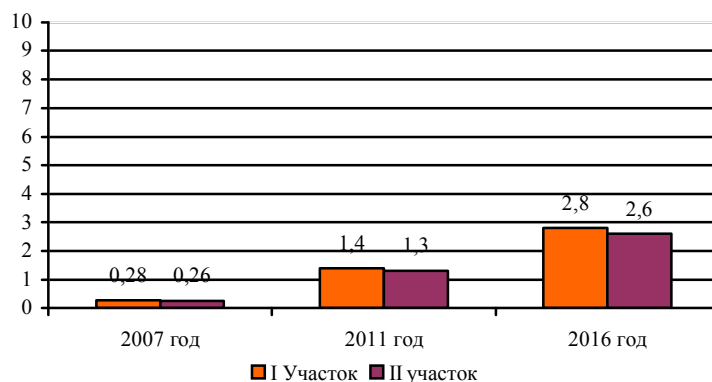


Рис. 3. Прогнозное увеличение минерализации верхнего слоя грунтовых вод

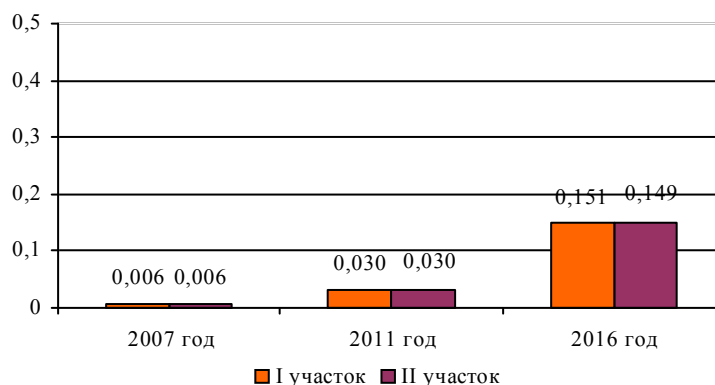


Рис. 4. Прогнозное накопление солей в почвогрунтах зоны аэрации

Многолетний прогноз засоления пород зоны аэрации и минерализации грунтовых вод давался с некоторым запасом (порядка 10-15%), поскольку, во-первых, не учитывался (хотя и очень слабый, но существующий) отток солей в глубь водоносного горизонта, во-вторых, возможно завышение минерализации оросительной воды. На точности прогноза могло сказаться также некоторое несоответствие фактических и расчетных оросительных норм. Возможны погрешности в определении исходных величин засоления пород зоны аэрации и минерализации грунтовых вод.

На время расчета прогноза засоление верхнего метрового слоя почвогрунтов (по сумме солей) в среднем на основной части территории Тасоткельского массива составлял менее 0,15 %, за исключением сильно и очень сильно засоленных земель, там она могла достигнуть 20-25%.

Прогнозная величина минерализации верхнего слоя грунтовых вод в среднем на всей площади массива находилась в пределах $2,8 \text{ г/дм}^3$, на территория с повышенной минерализацией до $3-3,5 \text{ г/дм}^3$.

Ежегодные гидрогеолого-мелиоративные исследования на Тасоткельском массиве орошения показали, что расчеты, выполненные в 2006 году, с высокой степенью точности подтвердили прогноз накопления солей в почвогрунтах в 2007-2010 годах. Это может служить основанием надежности прогноза и на последующие годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антоненко В.Н., Кулагин В.В. Мелиоративная гидрогеология и ирригация. Учебное пособие. Изд. КазНТУ. 2007
2. Антоненко В.Н. Водоснабжение и ирригация. Учебник. Изд. КазНТУ. 2001
3. Барон В. А., Планин Ю.Г. Прогноз режима минерализации грунтовых вод при орошении: М.: Недра. 1974.

Резюме

Жұмыста әр түрлі автор ұсынған, жер суландыру әдістеме және ықпалменнің топырақтардың тұздалуды болжауының нәтижелері қаралады. Жер астындағы сулардың беті және аэрацияның аймағы, тұздалуды шаманың есептеуі, сонымен бірге (Қазақстан Республикасы, Жамбыл облысы, Шу ауданы) Тасөткел суармалы алқабының мысалындағы олардың ары қарай дамытуын болжам жинақтағыш процестердің себебі бірінші суреттеледі.

Summary

This work reflects the methods and results of salinity prediction under the influence of irrigation, proposed by various authors. Describe causes of salt accumulative processes on the groundwater and aeration zone, calculation of salinity values, as well as the prediction for their further development as an example of Tasotkel irrigation array (Shy area, Kazakhstan).

*КазНТУ им.К.И. Сатпаева,
ГП «Зональный гидрогеолого-мелиоративный центр»МСХ РК*

Поступила 05.06.11