УДК [550.46+556.51]: 519.85

## ВЛИЯНИЯ ПАШЕННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ НА СТОК ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2014 Ю.Б. Кирста<sup>1,2</sup>, А.В. Пузанов<sup>1</sup>

 $^1$  Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул  $^2$  Алтайский государственный технический университете им. И.И. Ползунова

Поступила в редакцию 06.05.2014

На примере рек Алтае-Саянской горной страны с помощью системно-аналитического моделирования проанализировано влияние пашенного земледелия на сток взвешенных веществ. Установлены количественные зависимости стока от площади пашни в водосборных бассейнах рек в разные периоды года. В зимнюю межень добавка к стоку пропорциональна этой площади, а в остальное время года — линейному масштабу пахотных угодий. Разработана универсальная имитационная модель стока взвешенных веществ, описывающая его сезонную и многолетнюю динамику на основе данных о ландшафтной структуре и орографии речных бассейнов, пахотных площадях, среднемесячных температурах воздуха и месячных осадках. Модель использует лишь картографическую и гидрометеорологическую информацию и применима для произвольных речных бассейнов горной страны даже при отсутствии гидрохимических наблюдений.

Ключевые слова: взвешенные вещества, речной сток, математическое моделирование, пашенное земледелие, Алтай, Саяны

Территория Алтае-Саянской горной страны расположена между 50° и 56° с.ш., 83° и 100° в.д. и представляет собой часть мирового водораздела между гумидной областью Северного Ледовитого океана и аридной бессточной областью Центральной Азии. Преобладающие высоты хребтов горных систем составляют 2000-2500 м, достигая на Алтае 3500-4500 м. Разнообразные природно-климатические условия Ал тае-Саянской горной страны обусловливают большие различия в формировании гидрохимического стока рек, включая сток взвешенных веществ (ВВ). К влияющим на сток факторам можно отнести орографическую и климатическую неоднородность территории, различия в почвенно-растительном покрове, вертикальную поясность, сложную гидрогеологическую структуру речных бассейнов, питание рек как за счет осадков, так и ледников, сложное гидрографическое строение речной сети и др. В результате крайне затруднено выделение и анализ влияния на сток ВВ каждого фактора по отдельности. Несмотря на указанные сложности, математическое моделирование стока наносов в максимальной степени опирается на данные специальных исследофакторов среды непосредственно в речных горных бассейнах. Такие исследования трудоемки и требуют больших материальных затрат.

Кирста Юрий Богданович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник. E-mail: kirsta@iwep.ru Пузанов Александр Васильевич, доктор биологических наук, заместитель директора. E-mail:

puzanov@iwep.ru

В предлагаемой работе используется метод системно-аналитического моделирования (САМ) [1, 2], который был успешно применен для разработки имитационной математической модели водного стока горных рек [3] и стока ВВ [4]. Метод позволяет избежать затратных специализированных исследований, заменяя их архивными данными многолетних наблюдений за динамикой изучаемой характеристики — в нашем случае это концентрация ВВ в водном стоке.

Исходные материалы. С целью выполнения САМ стока ВВ были выбраны 33 речных бассейна Алтае-Саянской горной страны (рис. 1), для которых ранее была разработана модель водного стока [3]. Ограниченное количество ежегодных наблюдений за гидрохимическим стоком Гидрометеорологической службой России определило выбор четырех характерных периодов/сезонов: гидрологических первый (зимняя межень, XII-III месяцы), второй (весенне-летнее половодье, IV-VI), третий (летняя межень, VII-VIII), четвертый (осенняя межень с возможными паводками при сильных дождях, IX-XI). Учитывалось, что в каждом сезоне должно иметься одно или более измерений концентрации ВВ. После их усреднения были получены по четыре среднесезонных концентрации для каждого года наблюдений. В среднем по всем 33 бассейнам концентрации составили 6,48, 13,9 мг/л для 1, 2, 3, 4-го сезонов соответственно, и эти значения были использованы для нормировки всех имеющихся измерений ВВ.

Температуры воздуха и осадки характеризовались нами через доли/проценты от их среднемноголетних месячных значений. Для таких нормированных температур и осадков с помощью разработанного метода обобщения получена единая для всей Алтае-Саянской горной

страны их помесячная и межгодовая динамика [5]. Показано, что эта динамика может использоваться в качестве адекватной площадной характеристики изменения метеорологических условий при описании водного стока горных рек [3].

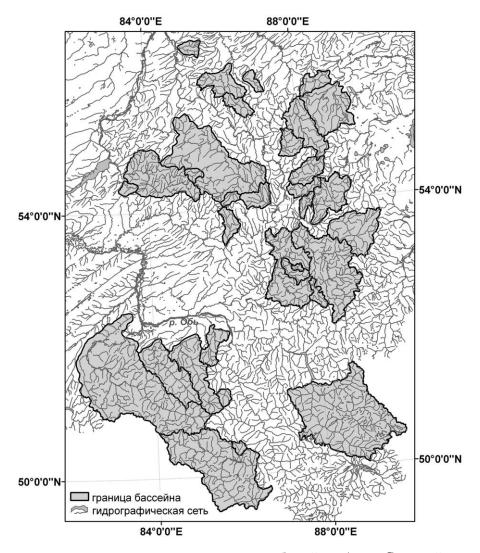


Рис. 1. Карта-схема расположения модельных речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны

Для учета ландшафтной структуры речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны выделено 12 типологических групп геосистем и отдельно 13-я для аквальных ландшафтов, имеющих незначительную площадь (табл. 1) [6]. Для всех групп в каждом речном бассейне по имитационной модели водного стока горных рек рассчитаны формируемые ими вклады в водный сток [3].

В целом, база данных для разработки модели стока ВВ включала:

- 1390 среднесезонных нормированных концентраций ВВ в разные годы по 33 речным бассейнам, то есть 1390/4≈350 величин для каждого сезона;

- расчетный вклад в водный сток от каждой группы геосистем в каждом речном бассейне по каждому году гидрохимических наблюдений (3120, 3480, 3180, 3350 значений водных стоков, нормированных на среднемноголетнее среднесезонное значение стока бассейна, для 1, 2, 3, 4-го гидрологических сезона соответственно);
- обобщенные по территории Алтае-Саянской горной страны нормированные месячные осадки и среднемесячные температуры воздуха за период 1951-2003 гг. (по 636 значений);
- площадь и средняя высота каждого из 33 речных бассейнов, высота его замыкающего створа, длина речного русла (от истока до створа):
- доля площади пашни (при ее наличии) в каждом речном бассейне.

**Таблица 1.** Среднесезонные концентрации взвешенных веществ (BB) в компонентах водного стока, формируемых ландшафтами Алтае-Саянской горной страны

Группы геосистем (ландшафтов)	Концентрации ВВ (a <sub>k</sub> , b, d в (2)) по 4-м гидроло- гическим сезонам года (XII-III, IV-VI, VII-VIII, IX-XI мес.), мг/л			
	1	2	3	4
гляциально-нивальные высокогорья (характеризуются параметром $a_1$ в (2))	1	6	0	0
гольцово-альпинотипные высокогорья и среднегорья, псевдогольцовые низкогорья $(a_2)$	0	0	0	0
тундрово-степные и криофитно -степные высокогорья $(a_3)$	20	205	0	0
лесные высокогорья, среднегорья и низкогорья $(a_4)$	4	140	11	7
экспозиционно-лесостепные и степные высокогорья и среднегорья ( $a_5$ )	24	226	20	0
лесостепные, степные низкогорья и предгорья $(a_6)$	4	138	22	10
межгорные котловины с различными вариантами степей и лесостепей $(a_7)$	5	0	7	2
степные и лесостепные подгорные и возвышенные аккумулятивные равнины $(a_8)$	24	50	15	0
недренируемые слабопроточные интра-зональные и интрапоясные ланд- шафты $(a_9)$	0	0	0	0
долины горных рек $(a_{10})$	16	114	37	20
долины равнинных рек $(a_{11})$	30	3	29	12
лесные возвышенные и подгорные равнины $(a_{12})$	3	0	1	1
аквальные ландшафты $(a_{13})$	16	61	0	0
подземный сток (b)	4	-18	4	5
пашня $(d)$	0,06	13,6	1,7	0,9

САМ стока взвешенных веществ. Основу САМ составляет определение структуры и параметров имитационной модели через решение обратной задачи оптимизационными методами (подробнее см. [1-3]). Путем последовательной проверки различных физически и гидрохимически непротиворечивых зависимостей, описывающих формирование стока ВВ под воздействием факторов среды, определяется система уравнений, дающая наименьшую квадратичную невязку между рассчитанными по модели и наблюдаемыми концентрациями ВВ. Для описания нетривиальных зависимостей процессов от факторов среды в САМ применяется универсальная функция *H*, задаваемая выражением:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) =$$

$$= \begin{cases} Y1 + Z1 \cdot (X - X1), & ecnu \quad X < X1 \\ \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}(X - X1) + Y1, & ecnu \quad X1 \le X < X2, \\ Y2 + Z2 \cdot (X - X2), & ecnu \quad X \ge X2 \end{cases}$$

$$(1)$$

где X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2 — подбираемые параметры; X — какая-либо переменная модели. Функция H является непрерывной кусочно-

линейной функцией из трех произвольных линейных фрагментов и позволяет аппроксимировать широкий спектр различных зависимостей между переменными и факторами среды путем изменения значений своих параметров.

Ранее в ходе системного анализа и САМ была разработана имитационная модель стока ВВ для 33 анализируемых речных бассейнов [4]. Уравнения модели учитывали сезонные осадки, средний поперечный уклон и ландшафтную структуру бассейнов. В настоящей работе продолжен системный анализ и САМ воздействующих на сток ВВ факторов среды, включая ранее отсутствующую пашню. Для разработки модели использовались 1390 среднесезонных концентраций ВВ, наблюдаемых в разные годы на замыкающих створах речных бассейнов, а также необходимая картографическая и метеорологическая информация. В рамках САМ было проанализировано воздействие на сток в разные гидрологические сезоны непосредственно пашенного земледелия. В результате получены следующие уравнения среднесезонного стока

для первого гидрологического сезона:

$$Q^{i} \cdot C^{i} = \sum_{k} a_{k} \cdot Q_{k}^{i} \cdot H(c_{1}, c_{1}, 1, 1, c_{2}, c_{3}, P) \cdot H(c_{4}, c_{4}, 1, 1, c_{5}, c_{6}, K^{i}) + b \cdot q^{i} + d \cdot S^{i} \cdot Q^{i},$$
(2a)

для второго, третьего и четвертого гидрологических сезонов:

$$Q^{i} \cdot C^{i} = \sum_{k} a_{k} \cdot Q_{k}^{i} \cdot H(c_{1}, c_{1}, 1, 1, c_{2}, c_{3}, P) \cdot H(c_{4}, c_{4}, 1, 1, c_{5}, c_{6}, K^{i}) + b \cdot q^{i} + d \cdot \sqrt{S^{i}} \cdot Q^{i},$$
(26)

где  $Q^i \cdot C^i$  – среднесезонный сток BB;  $Q^i$  – расчетный среднесезонный водный сток для замыкающего створа бассейна с номером *i*=1-33 в текущем году [3];  $C^i$  – наблюдаемые концентрации ВВ в речном стоке; Р - обобщенные по территории Алтае-Саянской горной страны нормированные осадки [5] за IX-XI месяцы предшествующего года для 1-го сезона или за IV-VI, VII-VIII, IX-XI месяцы для 2, 3, 4-го сезонов соответственно;  $a_k$  – параметры, отвечающие постоянной среднесезонной концентрации ВВ в расчетном среднесезонном водном стоке  $Q_k^i$ , формируемом k-ой группой геосистем за счет осадков P, k=1-13; b — параметр, сопоставляемый с постоянной среднесезонной концентрацией ВВ в расчетном приходящем (или уходящем) среднесезонном подземном водном стоке q', который формируется в бассейне i почвенногрунтовыми водами и водами зон трещиноватых пород;  $K^{i}$  – средний поперечный уклон бассейна і, рассчитываемый по картографическим данным [4]; H – кусочно-линейная функция (1);  $c_{1\div6}$ - параметры, отражающие влияние на сток ВВ осадков P и уклона  $K^{i}$ ; d – параметр, характеризующий увеличение концентрации BB в  $Q^{i}$  от каждого процента площади  $S^i$ ;  $S^i$  — относительная площадь пахотных земель (в процентах от площади бассейна і). Вместе с подмоделью пространственного обобщения и нормировки среднемесячных температур и месячных осадков [5], подмоделью водного стока [3] уравнения (2а), (2б) составляют полную имитационную модель стока ВВ.

В правой части уравнений (2) суммируются вклады в сезонный сток ВВ от каждой группы геосистем, обеспечиваемые поверхностным, внутрипочвенным и подземным водными стоками. Также отражена роль пашни. На вклад k-ой группы геосистем влияют осадки P за рассматриваемый гидрологический сезон и поперечный уклон  $K^i$  речного бассейна. Вклад  $b \cdot q^i$ в (2) через отрицательное или положительное значение концентрации ВВ в подземных водах (табл. 1) может учитывать эффект осаждения или, наоборот, повторного взвешивания ВВ из донных отложений. Рассчитываемое по модели водного стока [3] значение  $q^i$  включает вклад осадков предыдущего сезона и обмен влагой с почвенно-грунтовыми водами и водами зон трещиноватых пород.

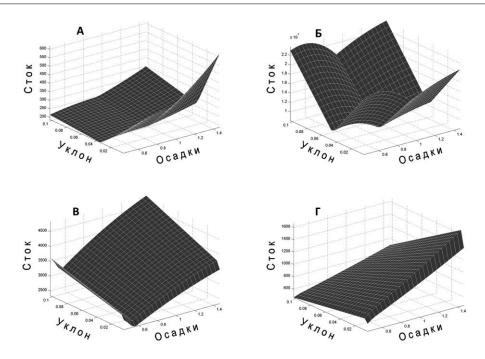
В ходе САМ путем решения обратной задачи для каждого из четырех рассматривемых гидрологических сезонов были найдены все параметры a, b, c, d в уравнениях (2) (табл. 1). При этом значения параметров  $a_k$ , где k=1-13, характеризуют постоянные среднесезонные концентрации ВВ в водных стоках от каждой из 13 групп геосистем Алтае-Саянской горной страны.

На рис. 2 приведены полученные зависимости среднесезонного стока ВВ от двух входных факторов модели: среднего уклона поверхности *К* и обобщенных нормированных осадков. В качестве образца ландшафтной структуры использован бассейн верховья р. Катунь с замыкающим створом около с. Тюнгур. На рисунке демонстрируется как изменялся бы сток ВВ при разных уклонах и осадках, если ландшафтная структура бассейна остается неизменной. Обсуждение характера зависимостей можно найти в [4].

Обсуждение результатов моделирования. Согласно уравнениям (2) влияние распашки почв на сток ВВ зависит от времени года. Для первого гидрологического сезона (зимняя межень, XII-III месяцы) в (2a) получена прямо пропорциональная зависимость соответствующей части стока от площади пахотных земель. Очевидно, это обусловлено проникновением почвенных частиц в почвенно-грунтовые воды по всей площади пашни и формированием этими водами стока ВВ в зимнюю межень, когда отсутствуют поверхностный и внутрипочвенный водные стоки. Для остальных сезонов в (26) формируемая пашней часть стока ВВ оказалась пропорциональной квадратному корню от площади пахотных земель, то есть их линейному масштабу. Такая зависимость объясняется наличием в эти сезоны поверхностного и внутрипочвенного склоновых стоков воды, смывающих почвенные частицы в речной водоток по сути лишь с нижней границы пашни.

Для оценки степени адекватности (2) воспользуемся предложенным ранее универсальным критерием [3-5]:

$$A = S_{pa3H} / \sqrt{2} S_{\mu a \delta \pi}, \qquad (3)$$



**Рис. 2.** Зависимость стока ВВ (гр/сек) от среднего уклона речных бассейнов и нормированных осадков для Алтае-Саянской горной страны:

A-1 гидрологический период/сезон (зимняя межень, XII-III месяцы), осадки за IX-XI месяцы предшествующего года; B-2 сезон (весенне-летнее половодье, IV-VI), осадки за IV-VI месяцы текущего года; B-3 сезон (летняя межень, VII-VIII), осадки за VII-VIII;  $\Gamma-4$  сезон (осенняя межень, IX-XI), осадки за IX-XI.

где A — критерий адекватности;  $S_{paзн}$  — стандартное (среднеквадратичное) отклонение для разности сравниваемых расчетного и наблюдаемого рядов моделируемой характеристики,  $S_{naбn}$  — стандартное отклонение для наблюдаемого ряда,  $1/\sqrt{2}=0.71$ — множитель.

Критерий A в (3) отличается от часто используемого показателя RSR [7, 8] множителем 0,71. Согласно правилам сложения дисперсий расчетного и наблюдаемого рядов мы имеем следующие характерные значения A:

- от 0 до 0.71 различная степень идентичности рядов и адекватности модели с наилучшей при 0;
- от 0,71 до 1 модель имеет низкую адекватность и плохо отражает закономерности, присущие наблюдаемому ряду. Для прогностических оценок вместо нее лучше использовать среднее значение характеристики;
- более 1 дисперсия расчетного ряда больше, чем у наблюдаемого. Иногда необходимо сохранение какой-либо моделью/подмоделью дисперсии наблюдаемого ряда при ее использовании в расчетах в других моделях/подмоделях. В таких случаях модель лучше заменить на случайные вариации характеристики около среднего значения с дисперсией, отвечающей наблюдаемому ряду. В этом случае критерий А будет равен 1. Вернемся к имитационной модели стока ВВ, включающей пространственное обобщение и нормировку среднемесячных температур и

месячных осадков [5], расчет водного стока [3] и уравнения (2) как три связанные подмодели.

Критерий адекватности А для обобщенных нормированных температур и осадков составляет 0,39 и 0,62 соответственно, а для расчета водного стока в среднем по четырем выделенным гидрологическим сезонам – порядка 0,6. Для оцени адекватности уравнений (2) воспользуемся расчетным и наблюдаемым рядами концентрации ВВ в речном стоке. Критерий А по отдельным гидрологическим сезонам оказался равным: 1 сезон – А=0,61; 2 сезон – А=0,59; 3 сезон – А=0,64; 4 сезон – А=0,67. По правилу сложения дисперсий погрешность расчета стока ВВ должна быть заметно больше каждой из погрешностей расчета осадков и водного стока. Мы же видим, что критерий А мало изменился по сравнению с его значениями для этих переменных модели. Отсюда можно сделать вывод, что уравнения (2) с высокой степенью адекватности описывают интегральные гидрохимические процессы в речных бассейнах и дают малый собственный вклад в общую погрешность расчетов стока ВВ.

По разработанной модели стока ВВ можно рассчитать среднемноголетние концентрации ВВ по гидрологическим сезонам, а также их сезонную и межгодовую динамику для любой точки любой реки Алтае-Саянской горной страны, причем при отсутствии каких-либо гидрохимических наблюдений. Для этого используется единая для всей Алтае-Саянской горной страны

по-месячная многолетняя динамика нормированных месячных температур и осадков [5]. Такая дина-мика и соответствующая картографическая информация о водосборной территории, отвечающей выбранной точке реки, позволяют найти по модели водного стока [3] все входящие в (2) доли стока от каждой группы геосистем  $(Q_i^i/Q^i)$ и подземного стока  $(q^{i}/Q^{i})$ . Путем их подстановки вместе с параметрами модели (табл. 1) в уравнения (2) находятся все искомые концентрации ВВ. При наличии наблюдений по водному стоку за 1-2 года, позволяющих восстановить динамику его ненормированных значений [3], с помощью разработанной модели аналогичным образом рассчитывается межсезонная и межгодовая динамика непосредственно стока ВВ.

## Выводы:

- 1. С помощью САМ разработана универсальная модель стока ВВ для расчета его сезонной и многолетней динамики в речных бассейнах Алтае-Саянской горной страны. Модель характеризует основные особенности гидрологических и гидрохимических процессов в разные гидрологические периоды года и применима для произвольных бассейнов исследованной территории даже в отсутствие соответствующих гидрохимических наблюдений.
- 2. Показано, что сток ВВ в реках Алтая зависит как от ландшафтной и орографической структур водосборной территории, метеорологических факторов, так и наличия в речных бассейнах пашни. Установлены зависимости стока ВВ от площади пашни в разные периоды года: если в зимнюю межень добавка к стоку ВВ пропорциональна этой площади, то в остальное время года она пропорциональна квадратному корню из нее, то есть линейному масштабу пахотных угодий.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по проекту VIII.76.1.4.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Kirsta, Yu.B. System-analytical modeling Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // Ecol. Modeling. 2006. Vol. 191. P. 315-330
- 2. *Кирста*, *Ю.Б.* Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем / *Ю.Б. Кирста*, *Б.Ю. Кирста*. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2009. 270 с.
- 3. *Кирста, Ю.Б.* Имитационная математическая модель стока средних и малых рек для горных территорий / *Ю.Б. Кирста, А.В. Пузанов, О.В. Ловцкая* и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14. №1(9). С. 2334-2342.
- 4. *Кирста*, *Ю.Б.* Универсальная математическая модель стока взвешенных веществ для бассейнов горных рек / *Ю.Б. Кирста*, *А.В. Пузанов*, *О.В. Ловцкая*, *Л.Ф. Лубенец* // Устойчивое развитие горных территорий. 2012. №3-4 (13-14). С. 46-53.
- Кирста, Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // Мир науки, культуры, образования. 2011. № 3(28). С. 330-337.
- Кирста, Ю.Б. Типизация ландшафтов для оценки речного стока в Алтае-Саянской горной стране / Ю.Б. Кирста, Л.Ф. Лубенец, Д.В. Черных // Устойчивое развитие горных территорий. 2011. №2(8). С. 51-56.
- 7. Singh, J. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT / J. Singh, H.V. Knapp, M. Demissie // ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey, 2004. URL: www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2004-08.pdf. (дата обращения: 10.04.2014).
- 8. *Moriasi*, *D.N.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation / *D.N. Moriasi*, *J.G. Arnold*, *V.W. Van Liew* // Transactions of the ASABE. 2007. Vol. 50(3). P. 885-900.

## INFLUENCES OF ARABLE LANDS AGRICULTURE ON THE SUSPENDED SUBSTANCES DRAIN

© 2014 Yu.B. Kirsta<sup>1,2</sup>, A.V. Puzanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Water and Ecological Problems SB RAS, Barnaul <sup>2</sup> Altai State Technical University named after I.I. Polzunov

On the example of rivers on Altai-Sayansk highland by means of system and analytical modeling influence of arable lands agriculture on suspended substances drain is analysed. Quantitative dependences of drain on arable lands area in water collecting basins of rivers during the different periods of year are established. In winter low water the additive to a drain is proportional to this area, and in the rest time of year – to the linear scale of arable lands. The universal imitating model of suspended substances drain, describing its seasonal and long-term dynamics on the basis of data on landscape structure and orography of river pools, the arable lands, average monthly air temperatures and monthly precipitation is developed. The model uses only cartographical and hydrometeorological information and is applicable for any river basins of the highland even in the absence of hydrochemical observation.

Key words: suspended substances, river drain, mathematical modeling, arable lands agriculture, Altai, Sayan Mountains

Yuriy Kirsta, Doctor of Biology, Main Research Fellow. E-mail: kirsta@iwep.ru: Alexander Puzanov, Doctor of Biology, Deputy Director. E-mail: puzanov@iwep.ru