

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ



УДК [550.46+556.51]:004.94

Ю.Б. Кирста, А.В. Пузанов  
Yu.B. Kirsta, A.V. Puzanov

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СТОКА ГОРНЫХ РЕК: 1. МОДЕЛЬ СТОКА ФОСФАТОВ

### MODELING OF HYDROCHEMICAL COMPOSITION OF MOUNTAIN RIVER RUNOFF: 1. MODEL FOR PHOSPHATE RUNOFF

**Ключевые слова:** системно-аналитическое моделирование, гидрохимический сток, фосфаты, горные реки, Алтай, Саяны.

На примере 34 средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны с помощью системно-аналитического моделирования разработана универсальная математическая модель сезонной и многолетней динамики стока фосфатов (анионов  $\text{PO}_4^{3-}$ ). Входными факторами и переменными модели являются: пространственно обобщенные по Алтае-Саянской горной стране нормированные месячные осадки и среднемесячные температуры воздуха; водные стоки, рассчитываемые для отдельных ландшафтов в речных бассейнах по ранее разработанной модели водного стока горных рек; картографическая информация о площади и средней высоте бассейнов; высоте замыкающих их речных створов; длине речных русел; площади пашни. Для учета ландшафтной структуры речных бассейнов выделены 13 типологических групп геосистем (ландшафтов). Путем решения обратной задачи в ходе системно-аналитического моделирования для четырех гидрологических сезонов года найдены постоянные среднесезонные концентрации фосфатов в водных стоках, поступающих в реки с каждого из выделенных ландшафтов. Для последних во всех 34 речных бассейнах рассчитана сезонная и многолетняя (1951-2003 гг.) динамика стока  $\text{PO}_4^{3-}$ . Пахотные земли, при их значительных площадях, дают на протяжении всего года заметный вклад в сток фосфатов, что может объясняться использованием на сельскохозяйственных полях минеральных удобрений. Объ-

единенные в один комплекс модели пространственного обобщения и нормировки среднемесячных температур и месячных осадков, водного и гидрохимического стоков позволяют рассчитать сезонную и многолетнюю динамику стока фосфатов для любых речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны. Все модели применимы при ограниченной экспериментальной гидрометеорологической и гидрохимической информации по речным бассейнам.

**Keywords:** system-analytical modeling, hydrochemical runoff, phosphates, mountain rivers, the Altai, the Sayan.

A universal mathematical model for seasonal and long-term dynamics of phosphates (anions  $\text{PO}_4^{3-}$ ) runoff was developed based on the system-analytical modeling and the example of 34 mid-size and small rivers of the Altai-Sayan mountain country. The input factors and variables of the model are as following: spatially generalized for the Altai-Sayan mountain country normalized monthly precipitation and mean monthly air temperature; water runoff estimated for individual landscapes in river basins by the previously developed model for water runoff of mountain rivers; the cartographic information on the area and average altitude of the basins; the height of the outlet; the length of river channels; the area of arable land. A total of 13 typological geosystem groups (landscapes) were selected to account for a landscape structure of river basins. The solution of the inverse problem during the system-analytical modeling for the four hydrological seasons of the year allowed

finding the permanent seasonal average concentrations of phosphates in the water runoff entering the rivers from each of the specified landscapes. The seasonal and long-term (1951-2003) dynamics of  $PO_4^{3-}$  runoff was evaluated for the landscapes in all 34 river basins. Large areas of arable lands contribute significantly to the runoff of phosphates throughout the year that is associated with the use of fertilizers. The combined models of spatial generalization

and normalization of mean monthly temperature and monthly precipitation, water and hydrochemical runoff allow us to estimate seasonal and long-term dynamics of phosphates runoff for all river basins of the Altai-Sayan mountain country. All the models are applicable even in case of limited experimental hydrometeorological and hydrochemical data on river basins.

**Кирста Юрий Богданович**, д.б.н., проф., гл. н.с. Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул. Тел.: (3852) 666-457. E-mail: kirsta@iwep.ru.

**Пузанов Александр Васильевич**, д.б.н., проф., ВрИО директора, Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул. Тел.: (3852) 666-460. E-mail: iwep@iwep.ru.

**Kirsta Yuriy Bogdanovich**, Dr. Bio. Sci., Prof., Chief Staff Scientist, Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul. Ph.: (3852) 666-457. E-mail: kirsta@iwep.ru.

**Puzanov Aleksandr Vasilyevich**, Dr. Bio. Sci., Prof., Acting Director, Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul. Ph.: (3852) 666-460. E-mail: iwep@iwep.ru.

### Введение

Решение проблем рационального использования водных ресурсов, в том числе для орошения, требует разработки адекватных математических моделей, количественно характеризующих качество этих ресурсов. Гидрохимический сток рек является одной из важнейших характеристик качества их вод. Анализ закономерностей формирования гидрохимического стока особенно трудоемок для горных территорий из-за их сложного гидрогеологического строения, разнообразного почвенно-растительного покрова, сложной пространственно-временной структуры климатических полей, трудоемкости и больших материальных затрат на подобные исследования. Крайне затруднена количественная оценка воздействия на сток разнообразных факторов среды.

**Цель** исследования – разработка модели гидрохимического стока на примере растворимой формы фосфатов (анионов  $PO_4^{3-}$ ). Нами используется системный подход и хорошо зарекомендовавший себя метод системно-аналитического моделирования (САМ) с привлечением ГИС-технологий [1, 2].

Сток  $PO_4$  зависит от идущих в речных бассейнах геохимических процессов, внесения на сельскохозяйственные поля фосфорных удобрений и возможного «сухого» выпадения фосфатов из атмосферы на поверхность водосбора [3]. Важной особенностью поведения фосфатов в почвах являются их слабая растворимость и иммобилизация (переход в нерастворимую форму) [4].

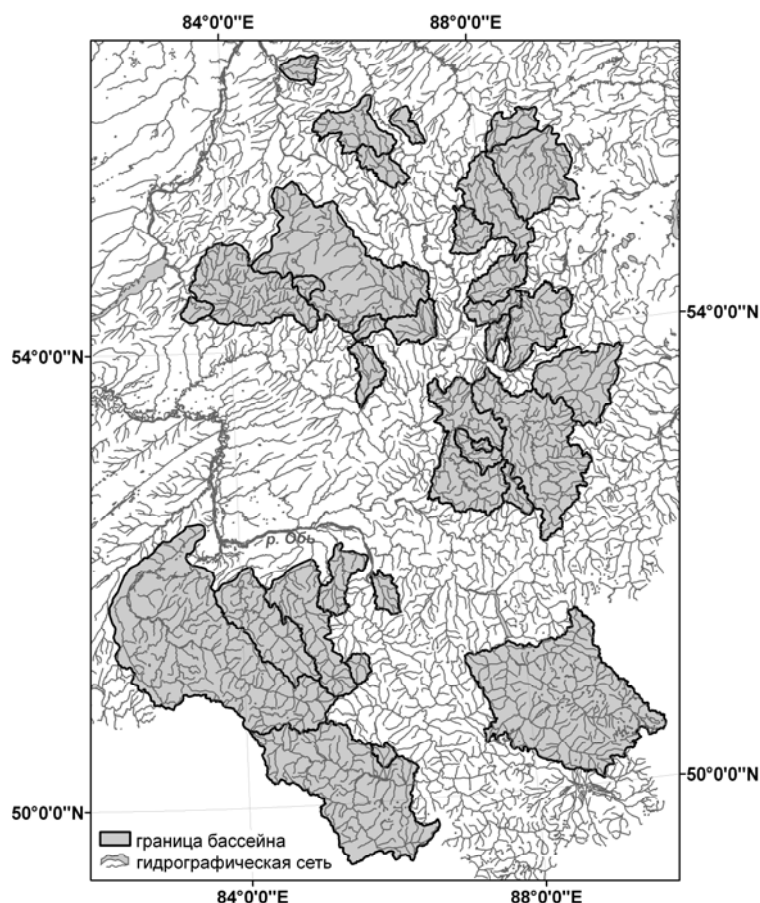
### Объекты и методы

Рассматриваемая в данном исследовании территория Алтае-Саянской горной страны представляет собой часть мирового водораздела между гумидной областью Северного Ледовитого океана и аридной бессточной об-

ластью Центральной Азии. Климат резко континентален, с холодной зимой и холодным летом. У рек наибольший водный сток наблюдается в теплое время года и составляет до 80-90% годового.

Для выполнения САМ гидрохимического (анионов  $PO_4^{3-}$ ) стока средних и малых рек страны взяты 34 бассейна (рис. 1), для которых ранее была разработана имитационная модель водного стока [5]. Динамика водного и гидрохимического стоков рассчитывалась для периода 1951-2003 гг. по 4 характерным гидрологическим периодам/сезонам: 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 экспериментальных измерений концентраций  $PO_4$ . После их усреднения были получены по четыре среднесезонных концентрации для каждого года наблюдений. В среднем по всем 34 бассейнам концентрации  $PO_4$  составили 0,019; 0,029; 0,018; 0,017 мг/л для 1-, 2-, 3-, 4-го сезонов соответственно. Эти значения были использованы для нормировки наблюдаемых значений концентраций и перехода, тем самым к безразмерным единицам измерений.

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 Алтае-Саянской горной страны их многолетняя помесечная динамика [6]. Показано, что эта динамика является адекватной площадной характеристикой изменения метеорологических полей всей страны.



**Рис. 1. Карта-схема расположения 34 модельных речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны**

**Найденные в ходе САМ среднесезонные концентрации фосфатов (анионов  $PO_4^{3-}$ ) в водных стоках, поступающих с ландшафтов Алтае-Саянской горной страны**

**Таблица**

Группы геосистем (ландшафтов)	Концентрации $PO_4^{3-}$ по 4 гидрологическим сезонам года (XII-III, IV-VI, VII-VIII, IX-XI мес.), мг/л			
	1	2	3	4
1. Гляциально-нивальные высокогорья (характеризуются параметром $a_1$ в (2))	0,019	0	0,014	0
2. Гольцово-альпинотипные высокогорья и среднегорья, псевдогольцовые низкогорья ( $a_2$ )	0	0	0	0
3. Тундрово-степные и крио-фитно-степные высокогорья ( $a_3$ )	0,022	0	0,048	0
4. Лесные высокогорья, среднегорья и низкогорья ( $a_4$ )	0	0,008	0,003	0,008
5. Экспозиционно-лесостепные и степные высокогорья и среднегорья ( $a_5$ )	0,024	0,011	0,002	0
6. Лесостепные, степные низкогорья и предгорья ( $a_6$ )	0	0,137	0,012	0,015
7. Межгорные котловины с различными вариантами степей и лесостепей ( $a_7$ )	0	0,147	0,074	0,078
8. Степные и лесостепные подгорные и возвышенные аккумулятивные равнины ( $a_8$ )	0,095	0,089	0,037	0,023
9. Недренируемые слабо-проточные интразональные и интрапоясные ландшафты ( $a_9$ )	0	0	0	0
10. Долины горных рек ( $a_{10}$ )	0	0,074	0,066	0,020
11. Долины равнинных рек ( $a_{11}$ )	0	0,111	0,009	0,008
12. Лесные возвышенные и подгорные равнины ( $a_{12}$ )	0	0	0	0
13. Аквальные ландшафты ( $a_{13}$ )	0,006	0	0	0
Подземный сток ( $b$ в (2))	0,018	0,016	0,006	0,007
Пашня ( $d$ в (2))	0,038	0,059	0,036	0,035

Для учета ландшафтной структуры речных бассейнов горной страны выделено 12 типологических групп геосистем и отдельно 13-я для аквальных ландшафтов, имеющих незначительную площадь (табл.) [7]. Для всех групп в каждом речном бассейне по модели водного стока горных рек были рассчитаны формируемые ими вклады в этот сток [5].

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

- 1240 среднесезонных концентраций фосфатов (анионов  $PO_4^{3-}$ ) в разные годы в водных стоках 34 речных бассейнов, то есть  $1240/4=310$  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 для 1-, 2-, 3-, 4-го гидрологических сезонов 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 34 речных бассейнов, высота его замыкающего створа, длина речного русла (от истока до створа);

- доля площади пашни (при ее наличии) в каждом речном бассейне.

### Результаты и их обсуждение

Основу САМ составляет определение структуры и параметров имитационных моделей сложноорганизованных природных систем путем решения оптимизационными методами обратной задачи [1, 2, 5]. Путем последовательной проверки различных физических и гидрохимических непротиворечивых зависимостей, описывающих формирование стока фосфатов ( $PO_4$ ) под воздействием факторов среды, определяется система уравнений, дающая наименьшую квадратичную невязку (сумму квадратов разностей) между рассчитанными и наблюдаемыми концентрациями вещества в воде. Построение модели стока  $PO_4$  выполняется в известной среде программирования MATLAB.

Для описания нетривиальных зависимостей процессов от факторов среды в САМ применяется универсальная функция  $H$ , задаваемая выражением:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 + Z1 \cdot (X - X1), & \text{если } X < X1 \\ \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1} (X - X1) + Y1, & \text{если } X1 \leq X < X2, \\ Y2 + Z2 \cdot (X - X2), & \text{если } X \geq X2 \end{cases} \quad (1)$$

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 (рис. 2).

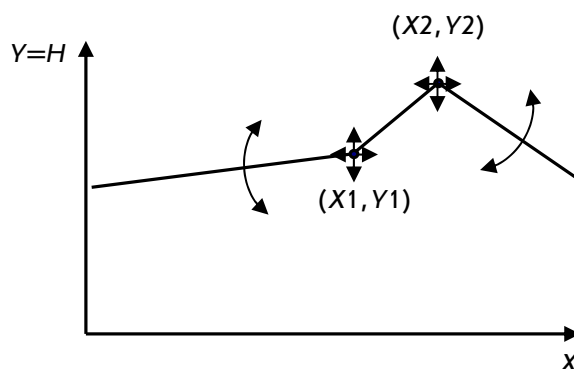


Рис. 2. Непрерывная кусочно-линейная функция  $H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X)$  из трех линейных фрагментов с произвольно меняемыми параметрами (уравнение (1))

В результате САМ стока фосфатов получены следующие универсальные уравнения, описывающие этот сток:

для первого гидрологического сезона –

$$\text{сток} = \sum_k a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i) + bq^i + dS^i Q^i \quad (2a)$$

для второго, третьего и четвертого гидрологических сезонов –

$$\text{сток} = \sum_k a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i) + bq^i + d\sqrt{S^i} Q^i \quad (26)$$

где  $P$  – обобщенные по территории Алтае-Саян нормированные осадки [6] 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 вещества ( $PO_4$ ) в расчетном водном стоке  $Q_k^i$ , формируемом  $k$ -й группой геосистем за счет осадков  $P, k=1 \div 13$ ;

$b$  – параметр, сопоставляемый с постоянной среднесезонной концентрацией вещества в расчетном приходящем (или уходящем) среднесезонном подземном водном стоке  $q^i$ , который формируется в бассейне  $i$  почвенно-грунтовыми водами и водами зон трещиноватых пород;

$K^i$  – средний поперечный уклон бассейна  $i$ , рассчитываемый по картографическим



данным как тангенс угла наклона склонов относительно горизонтали (рис. 3) [8];

$H$  – кусочно-линейная функция (1);

$c_{1-6}$  – параметры, отражающие влияние на сток вещества осадков  $P$  и уклона  $K^i$ ;

$d$  – параметр, характеризующий увеличение концентрации вещества от каждого процента площади  $S^i$  в расчетном водном стоке  $Q^i$ ;

$S^i$  – относительная площадь пахотных земель (в долях/процентах от площади бассейна  $i$ ).

Вместе с моделью пространственного обобщения и нормировки среднемесячных температур и месячных осадков [6], моделью водного стока [5] уравнения (2а), (2б) составляют полную имитационную модель климата, водного и гидрохимического ( $PO_4$ ) стоков горных рек. Все параметры уравнений (2) определены в ходе САМ через решение обратной задачи по ежегодно наблюдаемым среднесезонным стокам вещества, найденным как  $Q^i C^i$ . Величина  $Q^i$  характеризует среднесезонный водный сток для замыкающего створа бассейна с номером  $i=1\div 34$  в текущем году, который рассчитывается по модели водного стока и нормируется на свое среднесезонное наблюдаемое значение в бассейне  $i$  [5].  $C^i$  представляет собой наблюдаемые концентрации вещества в речном стоке для бассейна  $i$ , нормированные на их среднюю по 34 бассейнам величину за конкретный сезон. Отметим, что в САМ одновременно выполняется идентификация и верификация разрабатываемой модели (подробнее см. [2, 5]).

Значение поперечного уклона  $K^i$  в (2) рассчитывалось как тангенс угла между поверхностью бассейна и горизонталью (рис. 3) по формуле:

$$K^i = \frac{h}{1/2L} =$$

$$\frac{(\text{средняя высота бассейна } i) - (\text{высота створа})}{1/2(\text{площадь бассейна } i)/(\text{длина речного русла})}$$

Такой расчет  $K^i$  формально исключал влияние геометрического уклона речного русла, который не должен влиять на гидрохимический сток с ландшафтов.

В правой части (2) суммируются вклады в сезонный сток  $PO_4$  от каждой группы геосистем, обеспечиваемые поверхностным, внутрипочвенным и подземным водными стоками. Через  $H(c_1, c_1, 1, c_2, c_3, P)$  учитывается влияние на вклад  $k$ -й группы геосистем осадков  $P$  текущего гидрологического сезона, а через  $H(c_4, c_4, 1, c_5, c_6, K^i)$  – поперечного

уклона  $K^i$  речных бассейнов. В (2) отражена также роль пашни. Вклад  $b \cdot q^i$  учитывает приток или отток вещества при положительном или отрицательном  $q^i$ , рассчитываемом по модели водного стока. Значение  $q^i$  отражает вклад осадков предыдущего и текущего сезонов, а также обмен влагой с почвенно-грунтовыми водами и водами зон трещиноватых пород.

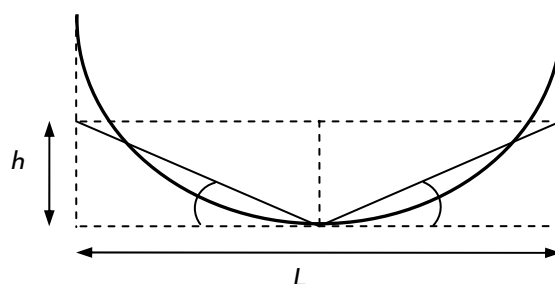


Рис. 3. Поперечный разрез речного бассейна и схема определения его среднего поперечного уклона  $K^i$  по средней высоте ( $h$ ) и ширине ( $L$ )

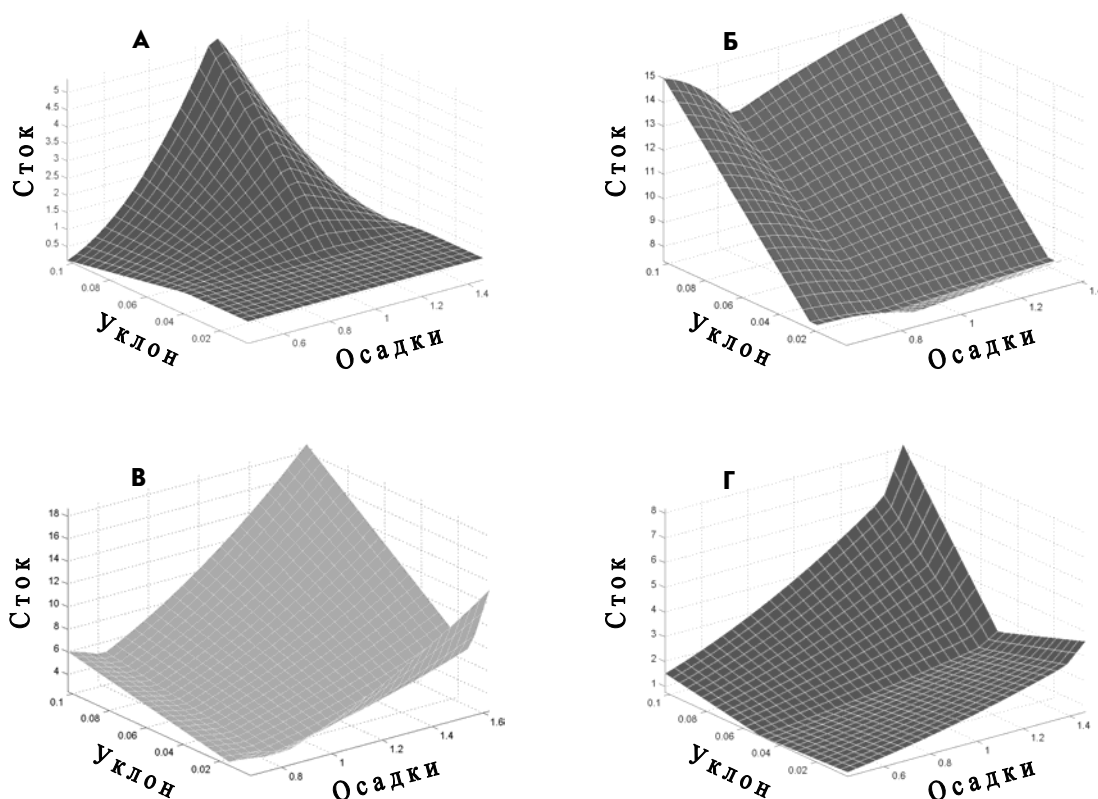
В ходе САМ через решение обратной задачи по стоку  $PO_4$  для каждого гидрологического сезона найдены все параметры  $a, b, c, d$  в (2) (табл.). Значения параметров  $a_k$ , где  $k=1\div 13$ , характеризуют постоянные среднесезонные концентрации  $PO_4$  в водных стоках от каждой из 13 групп геосистем Алтае-Саянской горной страны. Отметим, что какие-либо экспериментальные измерения концентраций  $PO_4$  для отдельных ландшафтов вообще отсутствовали, и  $a_k$  характеризуют их теоретические значения, найденные с помощью САМ.

Из данных таблицы следует, что наиболее значительные концентрации фосфатов в ландшафтных стоках отвечают лесостепным, степным низкогорьям и предгорьям ( $a_6$ ), межгорным котловинам ( $a_7$ ), равнинам ( $a_8$ ) и долинам рек ( $a_{10}, a_{11}$ ). Пахотные земли при значительных площадях дают заметный вклад в сток  $PO_4$  на протяжении всего года вследствие использования минеральных удобрений при возделывании сельскохозяйственных культур.

На рисунке 4 приведена типичная зависимость стока фосфатов (г/сек.) от осадков и поперечного уклона речных бассейнов для четырех гидрологических сезонов года. Отметим, что для зимней межени (рис. 4, А) приведены осадки за осенний сезон, так как зимой осадки остаются на поверхности в виде снега и не участвуют в формировании водного и гидрохимического стоков зимней межени. Мы видим, что сток

$PO_4$  в целом падает при уменьшении осадков  $P$ . Эта зависимость очевидна, поскольку меньшие осадки вымоют из почв и меньшее количество растворимых фосфатов ( $PO_4$ ). Обращает на себя внимание заметное падение стока  $PO_4$  с уклоном  $K^i$  в весенне-летнее половодье (рис. 4, Б) и такое же падение при больших осадках в другие сезоны года. Такая зависимость может объясняться преобладанием в таких случаях поверхностного/подповерхностного водного стока над грунтовым и подземным. Первый сток вымы-

вает фосфаты из верхнего 10 мм слоя почвы, где они преимущественно находятся [9, 10]. С уменьшением уклона  $K^i$  этот сток будет сокращаться, так как все большая доля поступившей в почву влаги будет просачиваться вглубь и уносить с собой часть растворенных фосфатов  $PO_4$  с их последующей иммобилизацией в нижележащих слоях. Поэтому уменьшение  $K^i$  вызовет и сокращение общего стока  $PO_4$ .



**Рис. 4. Зависимость стока фосфатов ( $PO_4$ , г/с) от гипотетически разного поперечного уклона речного бассейна и нормированных на свое среднееголетнее значение осадков для верховья р. Катунь (створ с. Тюнгур):**

- А** – зимняя межень (осадки за IX-XI месяцы предшествующего года);
- Б** – весенне-летнее половодье (осадки за IV-VI месяцы текущего года);
- В** – летняя межень (осадки за VII-VIII месяцы);
- Г** – осенняя межень (осадки за IX-XI месяцы)

### Выводы

На примере рек Алтае-Саянской горной страны выполнен системный анализ формирования стока фосфатов (анионов  $PO_4$ ). Проанализировано влияние на сток месячных осадков, ландшафтной структуры речных бассейнов (площадей ландшафтов), среднего поперечного уклона поверхности бассейнов, площади пашни.

С помощью метода системно-аналитического моделирования разработана универсальная имитационная модель сезонной и многолетней динамики стока  $PO_4$ . Установле-

ны количественные зависимости последнего от меняющихся факторов среды.

Объединенные вместе модели климата (пространственного обобщения и нормировки среднемесячных температур и месячных осадков) [6], водного стока [5] и гидрохимического стока (уравнения (2)) позволяют рассчитать сезонную и многолетнюю динамику стока  $PO_4$  для любых речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны. Для этого необходима лишь картографическая информация о ландшафтной структуре исследуемого бассейна, данные о среднемесячных температу-

рах воздуха и месячных осадках, а также 1-2-летние наблюдения за водным стоком с целью расчета коэффициента перехода от его нормированных значений в модели водного стока к измерению в м<sup>3</sup>/с.

#### Библиографический список

1. Kirsta Yu.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // *Ecol. Modelling*. – 2006. – Vol. 191. – P. 315-330.
2. Кирста Ю.Б., Кирста Б.Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2014. – 283 с.
3. Савичев О.Г., Иванов А.О. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // *Известия РАН. – Сер. геогр.* – 2010. – № 1. – С. 63-70.
4. Fageria N. K. The use of nutrients in crop plants. – CRC Press, Taylor and Franzis Group, 2009. – 448 p.
5. Кирста Ю.Б., Пузанов А.В., Ловцкая О.В., Лубенец Л.Ф., Кузник Я.Э., Пахотнова А.Ю. Имитационная математическая модель стока средних и малых рек для горных территорий // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2012. – Т. 14. – № 1 (9). – С. 2334-2342.
6. Кирста Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // *Мир науки, культуры, образования.* – 2011. – № 3(28). – С. 330-337.
7. Кирста Ю.Б., Лубенец Л.Ф., Черных Д.В. Типизация ландшафтов для оценки речного стока в Алтае-Саянской горной стране // *Устойчивое развитие горных территорий.* – 2011. – № 2 (8). – С. 51-56.
8. Кирста Ю.Б., Пузанов А.В., Ловцкая О.В., Лубенец Л.Ф. Универсальная математическая модель стока взвешенных веществ для бассейнов горных рек // *Устойчивое развитие горных территорий.* – 2012. – № 3-4 (13-14). – С. 46-53.
9. Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009. – Texas Water Resources Institute, 2011. Available electronically from <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>

10. Буцько А.А., Родькин О.И. Прогнозирование поступления фосфора в водные объекты с территории агроландшафтов // *Экологический вестник: научно-практический журнал.* – 2012. – № 2(20). – С. 76-83.

#### References

1. Kirsta Yu.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // *Ecol. Modelling*. – 2006. – Vol. 191. – P. 315-330.
2. Kirsta Yu.B., Kirsta B.Yu. Informatsionno-fizicheskii zakon postroeniya evolyutsionnykh sistem. Sistemno-analiticheskoe modelirovanie ekosistem. – Barnaul: Izd-vo Alt. gos. un-ta, 2014. – 283 s.
3. Savichev O.G., Ivanov A.O. Atmosfernye vypadeniya v basseine Srednei Obi i ikh vliyanie na gidrokhimicheskii stok rek // *Izvestiya RAN. Ser. geogr.* – 2010. – № 1. – S. 63-70.
4. Fageria N.K. The use of nutrients in crop plants. – CRC Press, Taylor and Francis Group, 2009. – 448 p.
5. Kirsta Yu.B., Puzanov A.V., Lovtskaya O.V., Lubenets L.F., Kuznyak Ya.E., Pakhotnova A.Yu. Imitatsionnaya matematicheskaya model' stoka srednikh i malykh rek dlya gornykh territorii // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN.* – 2012. – Т. 14. – № 1 (9). – С. 2334-2342.
6. Kirsta Yu.B. Prostranstvennoe obobshchenie klimaticheskikh kharakteristik dlya gornykh territorii // *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya.* – 2011. – № 3 (28). – С. 330-337.
7. Kirsta Yu.B., Lubenets L.F., Chernykh D.V. Tipizatsiya landshaftov dlya otsenki rechnogo stoka v Altae-Sayanskoi gornoj strane // *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii.* – 2011. – № 2 (8). – С. 51-56.
8. Kirsta Yu.B., Puzanov A.V., Lovtskaya O.V., Lubenets L.F. Universal'naya matematicheskaya model' stoka vzveshennykh veshchestv dlya basseinov gornykh rek // *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii.* – 2012. – № 3-4 (13-14). – С. 46-53.
9. Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009. – Texas Water Resources Institute, 2011. (Available electronically from <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>.)
10. But'ko A.A., Rod'kin O.I. Prognozirovaniye postupleniya fosfora v vodnye ob"ekty s territorii agrolandshaftov // *Ekologicheskii vestnik: nauchno-prakticheskii zhurnal.* – 2012. – № 2 (20). – С. 76-83.

