

УДК 550.46+556.51: 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СТОКА ГОРНЫХ РЕК.

1. СТОК МИНЕРАЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА

© 2016 Ю.Б. Кирста^{1,2}, А.В. Пузанов¹¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Статья поступила в редакцию 19.04.2016

На примере 34 средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны с помощью системно-аналитического моделирования разработаны три универсальные математические модели сезонной и многолетней динамики стока минеральных соединений азота (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+). Для учета ландшафтной структуры речных бассейнов выделены 13 типологических групп геосистем. Рассчитаны вклады каждой группы и пашни в соответствующий гидрохимический сток для четырех гидрологических сезонов года.

Ключевые слова: системно-аналитическое моделирование, гидрохимический сток, азот, горные реки, Алтай, Саяны

Решение проблем рационального использования водных ресурсов в современных условиях требует разработки адекватных математических моделей, количественно характеризующих качество поверхностных вод. Гидрохимический сток рек является одной из важнейших характеристик качества их вод, определяющих питьевое водоснабжение населения. Выявление закономерностей формирования стока в различных природно-климатических условиях важно для лучшего понимания взаимодействий между компонентами природной среды и повышения эффективности водоохранных мероприятий. 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 важная для рационального природопользования количественная оценка воздействия на сток разнообразных факторов среды. Для решения этих сложных задач и разработки моделей гидрохимического стока на примере минерального азота нами используется системный подход и хорошо зарекомендовавший себя метод системно-аналитического моделирования (САМ) с ГИС-технологиями [1, 2].

Исходные материалы. Рассматриваемая в данной исследовании территория Алтае-Саянской горной страны расположена между 49° и 56° с.ш., 82° и 90° в.д. и представляет собой часть мирового водораздела между гумидной областью Северного Ледовитого океана и аридной бессточной областью Центральной Азии. Высоты хребтов горных систем Саян достигают 3000–3500 м, а Алтая – 3500–4500 м. Климат является резко континентальным с холодной зимой и холодным летом. На территорию легко проникают атлантические циклоны. Распределение осадков в Алтае-Саянской горной стране исследовано недостаточно. Согласно наблюдениям редких метеостанций, годовое количество осадков меняется в широких пределах. Например, северные склоны гор на высотах более 3000 м получают 1200–2500 мм осадков за год,

средние части склонов – до 600 мм и нижние – около 200 мм. Для всех рек страны наибольший водный сток наблюдается в теплый период года и составляет до 80–90% годового. Режим водного стока зависит, в основном, от таяния снега весной и количества выпадающих осадков летом и осенью. За счет таяния снега обычно формируется более 50% годового стока.

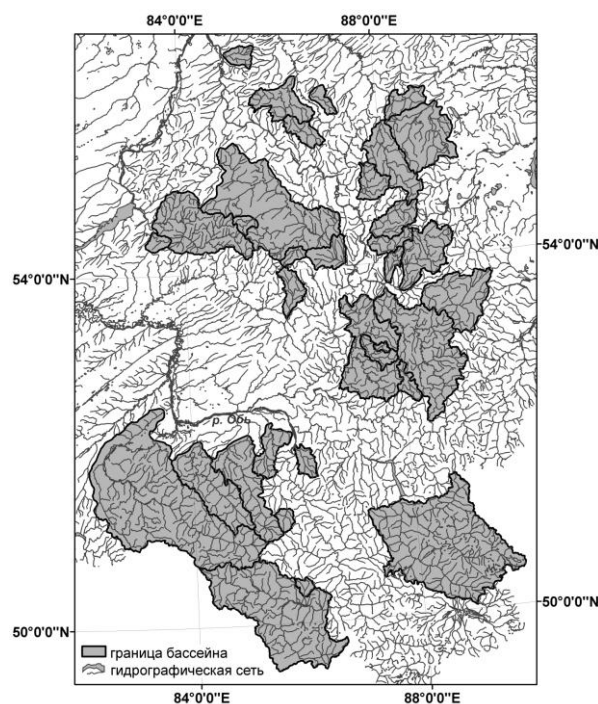


Рис. 1. Карта-схема расположения 34 модельных речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны

Для САМ гидрохимического стока средних и малых рек страны взяты 34 бассейна (рис. 1), для которых ранее была разработана модель водного стока [3]. Водный и гидрохимический стоки рассчитывались для 1951–2003 гг. по 4 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). Наблюдаемые концентрации минеральных соединений азота усреднялись по сезонам, и далее использовались

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

лишь четыре среднесезонные концентрации для каждого года наблюдений. В среднем по всем 34 бассейнам концентрации для 1, 2, 3, 4-го сезонов соответственно составили: нитритов (по аниону NO_2) 0.013, 0.014, 0.006, 0.007 мг/л, нитратов (по аниону NO_3) 0.64, 0.39, 0.17, 0.32 мг/л и аммония (по катиону NH_4) 0.14, 0.36, 0.20, 0.20 мг/л. На эти значения были нормированы все наблюдаемые среднесезонные концентрации с целью перехода в САМ к безразмерным единицам измерений.

Температуры воздуха и осадки характеризовались нами через доли/проценты от их среднеемноголетних месячных значений. Для таких нормированных температур и осадков с помощью разработанного метода обобщения получена единая для Алтае-Саянской горной страны их многолетняя помесечная динамика [4]. Показано, что эта динамика является адекватной площадной характеристики изменения метеорологических полей всей страны. Для учета ландшафтной

структуры речных бассейнов горной страны выделено 12 типологических групп геосистем и отдельно 13-я для аквальных ландшафтов, имеющих незначительную площадь (табл. 1) [5]. Для всех групп в каждом речном бассейне по модели водного стока горных рек были рассчитаны формируемые ими вклады в этот сток [3].

В целом, база данных для разработки модели стока минеральных соединений азота включала:

- 1320, 1440, 1400 среднесезонных нормированных концентраций соответственно нитритов, нитратов и аммония в разные годы в водных стоках 34 речных бассейнов, то есть 1320/4х330, 1440/4х360, 1400/4х350 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 сезона соответственно);

Таблица 1. Найденные в ходе САМ среднесезонные концентрации NO_2 , NO_3 , NH_4 в водных стоках, поступающих с ландшафтов Алтае-Саянской горной страны

Группы геосистем (ландшафтов)	Концентрации $\text{NO}_2/\text{NO}_3/\text{NH}_4$ по 4-м 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))	0/0/0.42	0/0/0.63	0.029/0.67/0	0/0/0
2. Гольцово-альпинотипные высокогорья и среднегорья, псевдогольцовые низкогорья (a_2)	0/0/0	0/0.31/0	0.012/0/0	0/0.09/0
3. Тундрово-степные и крио-фитно-степные высокогорья (a_3)	0/0/0.35	0/0/1.70	0/0/0	0/0/0.50
4. Лесные высокогорья, среднегорья и низкогорья (a_4)	0.006/0.91/0.13	0/0.48/0.45	0.004/0.06/0.11	0.008/0.18/0.24
5. Экспозиционно-лесостепные и степные высокогорья и среднегорья (a_5)	0.055/0/0.55	0.024/0/0.68	0.032/0.790.87/	0/0/0
6. Лесостепные, степные низкогорья и предгорья (a_6)	0.011/1.59/0.35	0.030/1.48/0.64	0.005/0.43/0.24	0.005/0.39/0.26
7. Межгорные котловины с различными вариантами степей и лесостепей (a_7)	0.034/0.48/0.44	0.003/0/0.11	0.001/0/0.80	0.010/0/0.97
8. Степные и лесостепные подгорные и возвышенные аккумулятивные равнины (a_8)	0.045/3.21/0.41	0.051/1.02/0.21	0.005/0.30/0.23	0.023/0.78/0.62
9. Недреннруемые слабо-проточные интразональные и интрапоясные ландшафты (a_9)	0/0/0	0/0/0	0.016/0.87/0	0.009/0.07/0
10. Долины горных рек (a_{10})	0.046/2.97/0	0/0/0.91	0.009/0.18/0	0.016/0.78/0
11. Долины равнинных рек (a_{11})	0.034/0.31/0.68	0.016/0/0.69	0.032/0.12/0.61	0/0.16/0
12. Лесные возвышенные и подгорные равнины (a_{12})	0.045/0/0.47	0/0/0	0/0.18/0.38	0/0.40/0
13. Аквальные ландшафты (a_{13})	0/0/0.06	0/0/1.08	0/0/0	0.019/0/0
Подземный сток (b в (2))	0.005/0.30/0.03	0.012/0.24/0.29	0.005/0.14/0.11	0.003/0.11/0.03
Пашня (d в (2))	0.025/0.46/0.06	0.014/0/0.31	0.002/0.03/0	0.005/0/0

• 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.

САМ стока нитритов, нитратов и аммония. Основу САМ составляет определение структуры и параметров имитационных моделей сложноорганизованных природных систем путем решения оптимизацион-

ными методами обратной задачи [1–3]. Путем проверки различных физических и гидрохимических непротиворечивых зависимостей, описывающих формирование стока NO_2 , NO_3 , NH_4 под воздействием факторов среды, определяются уравнения, дающие наименьшую квадратичную невязку (сумму квадратов разностей) между рассчитанными и наблюдаемыми концентрациями веществ в воде. Построение моделей выполняется в среде программирования MATLAB.

Для описания нетривиальных зависимостей характеризуемых 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).

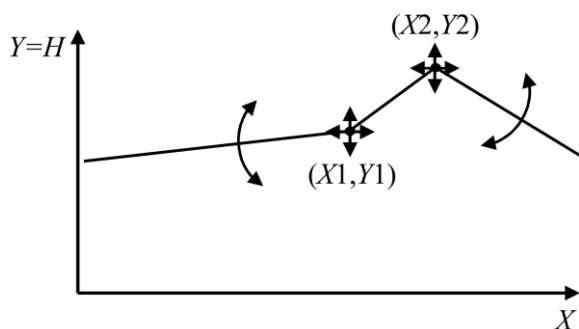


Рис. 2. Непрерывная кусочно-линейная функция $H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X)$ из трех линейных фрагментов с произвольно меняемыми параметрами (см. уравнение (1))

В результате САМ стоков NO_2 , NO_3 , NH_4 получены следующие универсальные уравнения, описывающие сток каждого минерального соединения:

- для первого гидрологического сезона –

$$\text{Сток} = \sum_k a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, c_2, c_3, P) \times \quad (2a)$$

$$\times H(c_4, c_4, 1, c_5, c_6, K^i) + bq^i + dS^i Q^i$$

- для второго, третьего и четвертого гидрологических сезонов –

$$\text{Сток} = \sum_k a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, c_2, c_3, P) \times \quad (2б)$$

$$\times H(c_4, c_4, 1, c_5, c_6, K^i) + bq^i + d\sqrt{S^i} Q^i$$

где P – обобщенные по территории Алтае-Саянской горной страны нормированные осадки [4] 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 (NO_2 , NO_3 или NH_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) [6]; 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 подмоделью пространственного обобщения и нормировки среднесезонных температур и месячных осадков [4], подмоделью водного стока [3] уравнения (2а), (2б) составляют полную имитационную модель стока NO_2 , NO_3 , NH_4 . Все параметры уравнений определены в ходе САМ через решение обратной задачи по ежегодно наблюдаемым среднесезонным стокам веществ, 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, рассчитывается по подмодели водного стока и нормируется на свое среднесезонное наблюдаемое значение в конкретном бассейне i [3]. C^i представляет собой наблюдаемые концентрации вещества в речном стоке, нормированные на их среднюю величину для бассейна i . Отметим, что в САМ одновременно выполнялись и идентификация, и верификация разрабатываемых моделей (подробнее см. [2, 3]).

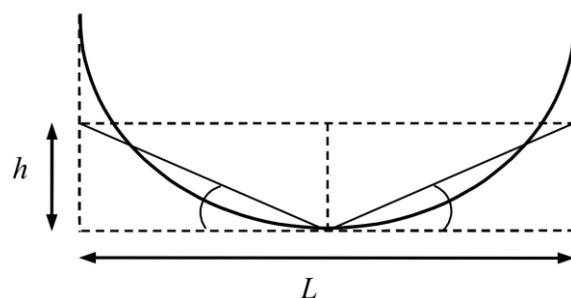


Рис. 3. Поперечный разрез речного бассейна и схема определения его среднего поперечного уклона K^i по средней высоте (h) и ширине (L)

Значение поперечного уклона K^i в (2) рассчитывалось как тангенс угла между поверхностью бассейна и горизонталью (рис. 2) 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 NO_2 , NO_3 или NH_4 от каждой группы геосистем, обеспечиваемые поверхностным, внутрипочвенным и подземным водными стоками. Через функцию $H(c_1, c_1, 1, c_2, c_3, P)$ характеризуется, наряду с прочими процессами, влияние высокого содержания NO_2 , NO_3 , NH_4 непосредственно в осадках P текущего гидрологического сезона [7]. На вклад k -й группы геосистем влияют как осадки P , так и поперечный уклон K^i речных бассейнов в $H(c_4, c_4, 1, c_5, c_6, K^i)$. В (2) отражена также роль

пашни. Вклад $b \cdot q^i$ учитывает приток или отток вещества при положительном или отрицательном q^i , рассчитываемом по подмодели 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 [3].

В ходе САМ через решение обратной задачи по отдельности для NO_2 , NO_3 или NH_4 для каждого гидрологического сезона найдены все параметры a , b , c , d в уравнениях (2) (табл. 1). Значения параметров a_k , где $k=1 \times 13$, характеризуют постоянные среднесезонные концентрации NO_2 , NO_3 или NH_4 в водных стоках от каждой из 13 групп геосистем Алтае-Саянской горной страны. Отметим, что какие-либо экспериментальные измерения концентраций NO_2 , NO_3 или NH_4 для отдельных ландшафтов вообще отсутствовали, и a_k характеризуют их теоретические значения, найденные с помощью САМ. Из табл. 1 мы видим, что наиболее значительные концентрации минерального азота дают лесостепные, степные низкогорья и предгорья (a_6), а также степные и лесостепные подгорные и возвышенные аккумулятивные равнины (a_8). Пахотные земли в теплое время года, наоборот, дают малые концент-

рации из-за активного использования соединений азота возделываемыми сельскохозяйственными культурами.

В качестве примера на рис. 4 приведена типичная зависимость стока нитритов (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. Мы видим, что сток NO_2 в целом падает при уменьшении уклона K^i , но начинает возрастать при дальнейшем уменьшении $K^i \leq 0.02$ (менее 20 промилле). Первая часть зависимости может объясняться увеличивающимся проникновением выпадающих осадков в почвы при уменьшении уклона, и поэтому большим «перехватыванием» почвами имеющегося в осадках минерального азота [7]. Вторая часть может быть связана с иной геохимической обстановкой на водосборной площади, которая сдвигается в сторону восстановительных процессов при меньших углах наклона поверхности. Плоский рельеф способствует максимальному увлажнению почв и более интенсивному восстановлению соединений азота до нитритов с поступлением последних в поверхностные воды.

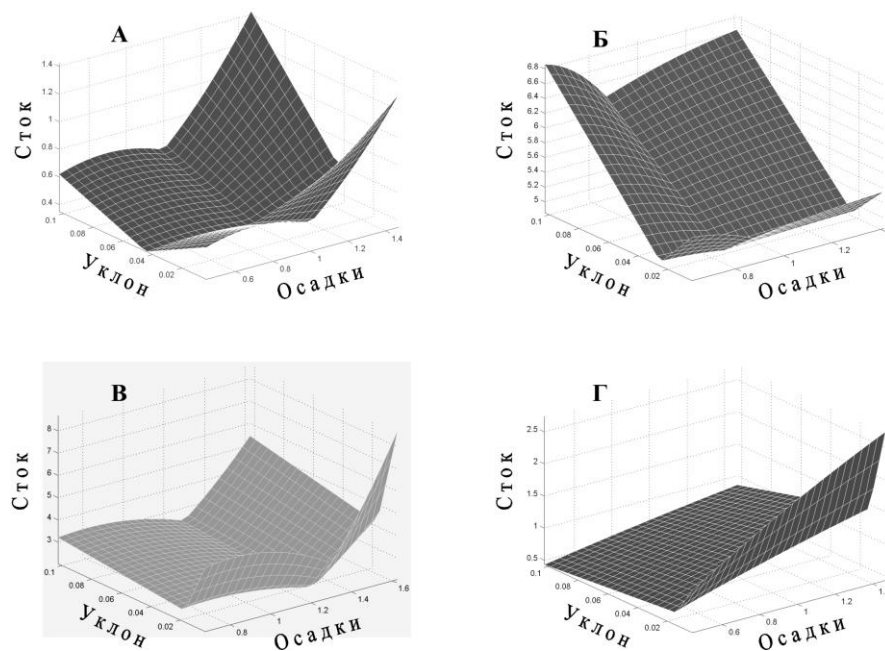


Рис. 4. Зависимость стока нитритов (NO_2 , г/сек) от гипотетически разного поперечного уклона речного бассейна и нормированных на свое среднееголетнее значение осадков для верховья р. Катунь (створ с. Тюнгур): А – зимняя межень, Б – весенне-летнее половодье, В – летняя межень, Г – осенняя межень

Выводы:

1. На примере рек Алтае-Саянской горной страны выполнен системный анализ формирования стока минеральных соединений азота (NO_2 , NO_3 , NH_4). Проанализировано влияние на сток месячных осадков, ландшафтной структуры речных бассейнов (площадей ландшафтов), среднего поперечного уклона поверхности бассейнов, площади пашни.

2. С помощью метода системно-аналитического моделирования разработаны универсальные имитационные модели сезонной и многолетней динамики стоков NO_2 , NO_3 , NH_4 . Установлены количественные зависимости этих стоков от факторов среды.

3. Подмодели пространственного обобщения и нормировки среднемесячных температур и месячных осадков [4], водного [3] и гидрохимического (уравнения (2)) стоков позволяют рассчитать сезонную и многолетнюю динамику стока NO_2 , NO_3 , NH_4 для любых речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны. При этом необходима лишь картографическая информация о ландшафтной структуре исследуемого бассейна, данные о среднемесячных температурах воздуха и месячных осадках, а также 1-2-летние наблюдения за водным стоком с целью расчета коэффициента перехода от его нормированных значений в подмодели водного стока к измерению в $\text{м}^3/\text{сек}$.

Авторы выражают благодарность д.х.н. Т.С.Патиной за активное обсуждение работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

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.* Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем / *Ю.Б. Кирста, Б.Ю. Кирста*. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2014. 283 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.* Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // *Мир науки, культуры, образования*. 2011. №3(28). С. 330-337.
5. *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.
6. *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.
7. *Савичев, О.Г.* Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек / *О.Г. Савичев, А.О. Иванов* // *Известия РАН. Сер. геогр.* 2010. №1. С. 63-70.

MODELING THE HYDROCHEMICAL DRAIN OF THE MOUNTAIN RIVERS.

1. DRAIN OF MINERAL COMPOUNDS OF NITROGEN

© 2016 Yu.B. Kirsta^{1,2}, A.V. Puzanov¹¹ Institute of Water and Ecological Problems SB RAS, Barnaul² Altai State Technical University named after I.I. Polzunov

On the example of 34 middle size and small rivers of Altai-Sayan highland by means of system and analytical modeling three universal mathematical models of seasonal and long-term dynamics of a drain of mineral compounds of nitrogen (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+) are developed. For the accounting of landscape structure of river basins 13 typological groups are allocated to geosystems. Deposits of each group and arable land to the corresponding hydrochemical drain for four hydrological seasons of year are calculated.

Key words: *system and analytical modeling, hydrochemical drain, nitrogen, mountain rivers, Altai, Sayan Mountains*

Yuriy Kirsta, Doctor of Biology, Main Research Fellow.

E-mail: kirsta@iwer.ru

Alexander Puzanov, Doctor of Biology, Deputy Director.

E-mail: puzanov@iwer.ru