

Н.С. ЯСИНСКИЙ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» г. Москва, Российская Федерация

Ю.С. ДАЦЕНКО

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова г. Москва, Российская Федерация

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА ФОСФОРА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В круговороте химических веществ фосфор является одним из элементов, определяющих плодородие почв и лимитирующих эвтрофирование водных объектов. В настоящее время в мире существует много моделей, описывающих процессы поступления и трансформации фосфора, однако в России такая модель ещё не создана. В статье описаны источники поступления на водосбор, процессы трансформации и поступления фосфора в водные объекты, в соответствии с современными представлениями мировой науки о круговороте фосфора. Выделены процессы, оказывающие определяющее влияние на концентрацию фосфора в водных объектах. Приведены методы расчета составляющих круговорота фосфора, которые могут быть использованы при создании подблока формирования стока фосфора в рамках усовершенствования гидрологической физико-математической модели ЕСОМАГ, уже неоднократно применявшейся в различных регионах России для расчета водного стока.

Фосфор, ЕСОМАГ, моделирование речного стока, эрозия почв, эвтрофирование

Введение. Фосфор является важнейшим биогенным элементом, необходимым для построения тканей живой клетки. Цикл фосфора затрагивает все компоненты природной среды, оказывая особенно сильное влияние на плодородие почв, развитие растений и эвтрофирование водных объектов. При антропогенном эвтрофировании происходит перестройка экосистемы водоёма, сводящаяся к преобладанию продукции над

деструкцией, что приводит к накоплению органического вещества в водоёме [1].

В круговороте фосфора можно выделить комплекс процессов, связанных с поступлением элемента из различных источников, его миграцией и химическими преобразованиями в почве, потреблением фосфора растениями и комплекс процессов транспорта фосфора, начиная от его выноса из почвы до поступления в водные объекты (рис. 1).

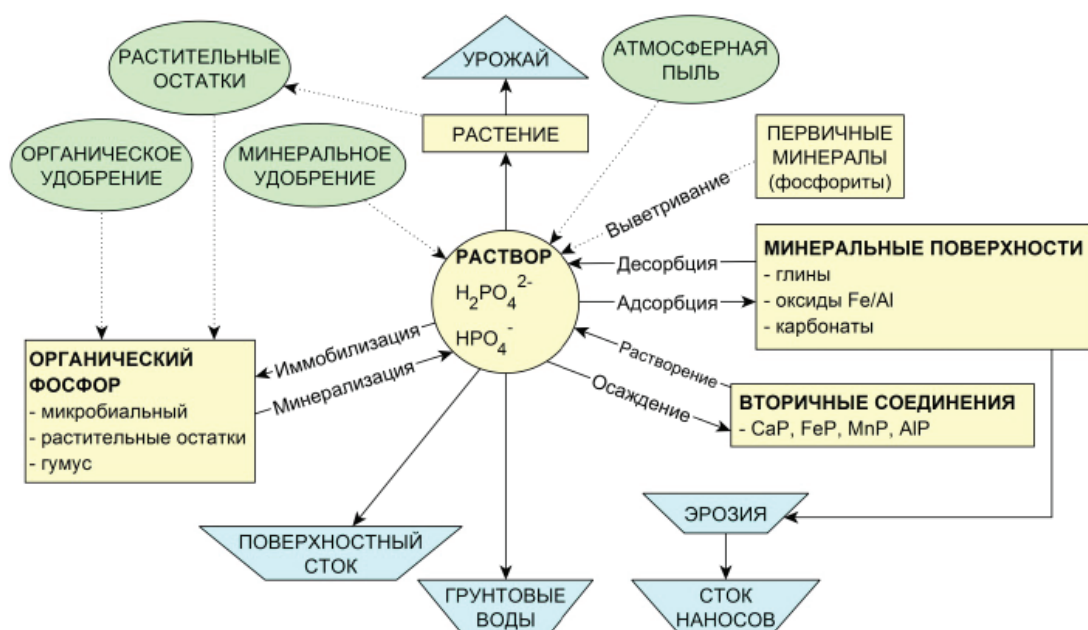


Рис. 1. Схема форм фосфора, их источников и путей выноса из почвенного профиля

В качестве основы для разработки фосфорной модели была выбрана гидрологическая модель ЕСОМАГ, для которой также разрабатывается блок расчета концентрации азота [2]. Данная статья является первой в ряду статей, касающихся разработки блока расчета стока фосфора. Обзор процессов круговорота азота дан в статье [3].

Результаты и их обсуждение.

1. Природные и антропогенные источники фосфора в системе речного водосбора

Главными природными источниками фосфора являются базальты, габбро, андезиты и апатиты, залегающие в гранитных формациях. В неизменной природной среде фосфор активно потребляется растительностью, поэтому в почвах наблюдается его дефицит. Наиболее высокие концентрации наблюдаются на водосборах, сложенных базальтами. Концентрация фосфора на водосборах, сложенных осадочными породами вдвое больше, чем на сложенных изверженными породами [4].

В XX веке вследствие добычи полезных ископаемых, производства фосфорных удобрений, фосфоросодержащей продукции, вылова моллюсков и морских животных, стало происходить накопление фосфора в почве и его вынос при эрозии почв и с водным стоком. Фосфор привносится с продуктами ветровой эрозии почв и сгорания растительности при лесных пожарах в виде атмосферных аэрозолей [4]. Содержание фосфора в атмосферных осадках по ряду исследований не превышает 0-40 мкг/л, что не позволяет считать этот источник значимым [5]. Согласно исследованиям [6] источник органических соединений фосфора в атмосферных осадках менее интенсивен, чем источник минерального.

Важным природным источником фосфора является растительный опад. Широколиственный опад разлагается быстрее, чем хвойный, а содержание фосфора в нем в полтора раза выше [7]. На полностью залесенном водосборе по данным исследований [8] в США вынос общего фосфора в год с 1 км² составляет 3-16.5 кг, включая 0.5-1.2 кг фосфора в растворённой форме.

Основным антропогенным диффузным источником фосфора выступает внесение минеральных и органических удобрений. Система удобрения зависит от географических условий, в которых находится

обрабатываемая территория. Так, в Нечернозёмной зоне система удобрения включает основное, припосевное внесение и подкормки. Подкормки вносятся обычно азотными удобрениями весной.

Сточные воды городов и территорий относятся к важным точечным источникам фосфора, так как фосфор удаляется в ходе водоочистки при применении самых эффективных методов лишь на 70-90% [9]. В XX веке вследствие роста населения и прогрессирующей урбанизации поступление фосфора в мировую сеть из канализационных систем достигло 2.56 млн т/год. При этом мировой речной сток растворенного общего фосфора по имеющимся данным достигает 4.5 млн т [1].

По имеющимся оценкам, в материковом стоке растворенный фосфор на 80% поступает из антропогенных источников, фосфор во взвешенных наносах на 50% имеет антропогенное происхождение [5]. По оценкам соотношения антропогенных источников в целом по США в 1987 г. 79% фосфора поступало вследствие внесения удобрений, 28% – за счет отходов животноводства и 6% – в растительных остатках сельскохозяйственных культур [10].

При отсутствии расписания внесения удобрений для конкретных угодий или типов землепользования, внесение фосфора следует рассчитывать по формуле (1)

$$D = U \cdot N \cdot K \quad (1)$$

где D – доза внесения фосфорного удобрения кг на га, U – планируемый урожай ц с га, N – нормы внесения удобрения кг на 1 ц культуры, K – поправочный коэффициент на подвижные формы фосфора [11].

2. Формы фосфора в почве и их трансформация

2.1. Общая схема взаимодействия различных форм фосфора

В почве фосфор представлен на 10-20% соединениями, относительно доступными для растений, на 50-60% соединениями малодоступными и на 20-40% соединениями, практически недоступными для растений [12]. Среди органических соединений в растворе выделяются ортофосфаты и моноэфир ортофосфорной кислоты, в меньшей степени пирофосфаты, полифосфаты, диэфир [4]. Неорганические формы представлены в основном ионами ортофосфорной кислоты HPO_4^{4-} , HPO_4^{2-} .

При моделировании выделяют обычно раствор, активный органический и минеральный блоки, пассивный органический и минеральный блоки и блок свежего неразложившегося вещества (рис. 2). В активных блоках происходит адсорбция на частицах почвы и разложение свежих органических остатков. В стабильном блоке происходит выпадение слабо растворимых соединений фосфора. Скорость реакции между раствором и активными блоками составляет дни, недели, тогда как между активными и пассивными блоками – годы [13]. Некоторые исследователи указывают, что период взаимодействия между активными и пассивными блоками следует при различных условиях принимать от 5 до 30 лет [14].

2.2. Растворимость соединений фосфора в почве

При сочетании с железом, алюминием или магнием в кислой среде образуются малорастворимые соединения. С увеличе-

нием щелочности раствора образование гидроксидов металлов уступает место взаимодействию с силикатами [15], а затем и образованию фосфатов кальция $Ca_3(PO_4)_2$ [4]. Фосфаты кальция типа гидроксо- и фторапатита $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ и $Ca_5(PO_4)_3F$ – малорастворимы в слабощелочной и нейтральной среде, но делаются подвижными по мере подкисления. Фосфаты полуторных окислов, преимущественно основного типа, тем менее растворимы, чем больше в них отношение металлов к фосфору и чем ниже рН (3-3,5); при повышении рН эти соединения начинают переходить в раствор. Фосфаты щелочей, моно- и дикальциевые (магниевого) фосфаты растворимы, геохимически подвижны, доступны растениям [16].

Растворимость минеральных фосфорных удобрений различна: самой высокой растворимостью отличаются удобрения типа суперфос, наименьшей – костная или фосфоритная мука.

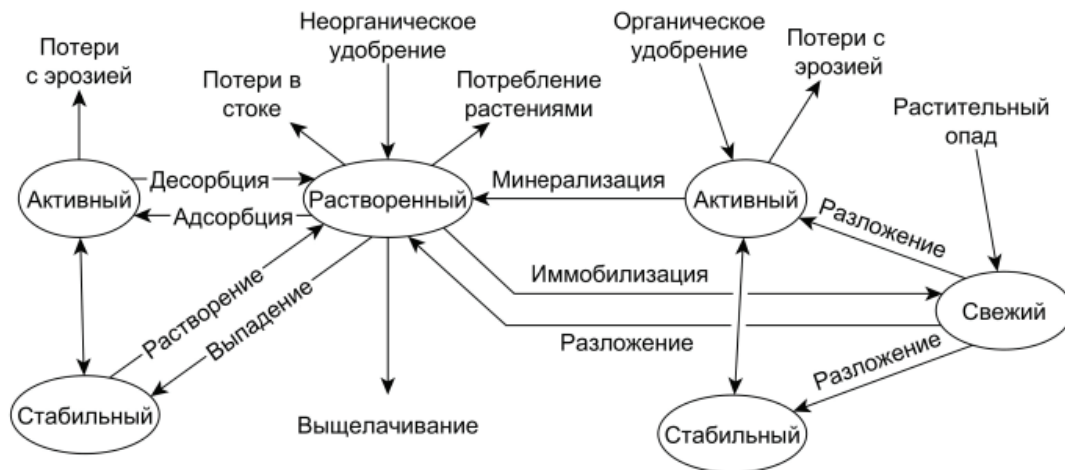


Рис. 2. Упрощенная схема процессов поступления, преобразования и выноса фосфора в почве, используемая в моделях биогенного стока

2.4. Адсорбция и десорбция фосфора

В качестве сорбционных барьеров могут выступать гидроксиды и оксиды металлов, глинистые минералы, обменные катионы, карбонаты кальция и магния, органо-минеральные образования. Наибольшая степень закрепления фосфора наблюдалась при времени взаимодействия не более 7-ми суток [4]. Сорбция фосфатов глинистыми минералами выражена в меньшей степени, чем гидроксидами железа. Н.И. Горбунов показал, что кислые почвы связывают фосфор интенсивнее черноземов; он получил следующие величины поглощения P_2O_5 почвами: красноземами до 0,9-1,2%; подзолистыми 0,6; черноземами 0,1% [12].

Процессы сорбции/десорбции и поглощения фосфора растением из почвенного раствора тесно связаны в равновесной системе. Количество адсорбированного фосфора хорошо описывается формулой Ленгмюра (2).

$$C_s = \frac{k_B(C_L - C_{L_0})}{1 + kC_L} \quad (2)$$

где C_s – количество поглощенного фосфора мэкв/100гр, k – константа, связанная с энергией закрепления фосфатов, B – максимум адсорбции, уменьшенный на величину десорбции, C_L – равновесная концентрация фосфора в растворе, мэкв/л, C_{L_0} – равновесная концентрация фосфора в растворе при равенстве сорбции и десорбции.

Графики зависимости поглощенного иона от его содержания в растворе (изотермы сорбции) для фосфора имеют гиперболическую форму. Исследования дерново-подзолистых почв показали значения фосфатной буферности (отношения способного к обмену иона к его содержанию в растворе) от 3.5 до 46. Предельное насыщение фосфором изменялось от 0.24 до 1.71 мэкв/100 г. Коэффициент k варьировал в пределах 2.72-33.87. Количество десорбируемого фосфора было наибольшим в высококультурных почвах. Наибольшие B были характерны для высокогумусированной, тяжелосуглинистой и дерново-карбонатных почв. Величина десорбции была выше у почв с тяжелым гранулометрическим составом [17].

2.5. Минерализация и иммобилизация фосфора в органических формах

Процессы разложения и минерализации определяются соотношением углерода к фосфору в растительных остатках, температурой, влажностью почвы, рН, интенсивностью земледелия, объемами внесения фосфорных удобрений и составом растительных остатков.

При расчете минерализации используются подходы, базирующиеся на коэффициентах скорости разложения. Примером может служить формула, применяющаяся в модели EPIC [18](3).

$$R_{ов} = K_{ов} O_{ов} (F_{тп} F_{вп})^{1/2} \min(F_{сн}, F_{ср}) \quad (3)$$

где $O_{ов}$, $K_{ов}$, $R_{ов}$ – соответственно количество фосфора в органическом веществе почвы, скорость разложения органического вещества и количество фосфора, минерализованного из органического вещества. $F_{тп}$ – фактор температуры почвы, $F_{вп}$ – фактор влажности почвы, $F_{сн}$ и $F_{ср}$ – зависят от отношения углерода к азоту и углерода к фосфору в органическом веществе почвы.

3. Миграция фосфорных соединений на водосборе и в речной сети

3.1. Вынос фосфора из почвенного раствора

По некоторым исследованиям при дождевых паводках лишь 6-22% подвижного фосфора перемещаются в растворенной форме. Обычно в растворе содержится больше органических, чем неорганических форм фосфора. Например, в легких почвах 90% фосфора находится в растворе в органической форме [19]. В грунтовых водах фосфора обычно меньше, чем в поверхностных. В ис-

следованиях [20] показано, что в некоторых колодцах Центрального региона РФ концентрации фосфора превышали на несколько порядков концентрацию в родниках (5-94 мкг/л), что позволяет говорить об ускоренной миграции фосфора в приповерхностные грунтовые горизонты, вызванную сельскохозяйственным освоением.

3.2. Вынос фосфора в ходе процессов эрозии почв

Средние годовые потери валового фосфора прежде всего связаны с транспортом взвешенных веществ и могут меняться от 0.4 кг с га на водосборах с низкими показателями эрозии до 5 кг с га на водосборах с интенсивной эрозией и высокой плотностью животноводства [21].

Расчет эрозии почв чаще всего производится по универсальным формулам эрозии почв (USLE). Это эмпирические формулы, отражающие смыв почвы в т/га в зависимости от коэффициентов, получаемых по геометрическим параметрам или свойствам поверхности водосбора (4).

$$W = 0.224 \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (4)$$

где W – среднегодовой модуль потерь почвы, т/га; R – фактор эродирующей способности дождя; K – фактор эродируемости почвы; LS – фактор рельефа, причем L – фактор длины склона, м, S – фактор уклона, град.; C – фактор севооборота (агротехники); P – фактор почвозащитных мероприятий [22].

Хотя эрозия является ведущим фактором выноса фосфора с водосборов, при сравнении с другими элементами было замечено, что фосфор в почве может быть малоактивен, находится в основном в трудно растворимых соединениях и вынос его просачивающимися и весенними талыми водами незначителен [23].

3.3. Потребление фосфора растениями

Для сельскохозяйственных культур фосфорные удобрения не только увеличивают урожай, но и улучшают его качество, например, крахмалистость картофеля, сахаристость свёклы. Признаками дефицита фосфора у зеленых растений являются покраснение стебля, позднее отмирание старых листьев, небольшие размеры растения. Однако, доступного для растений фосфора в почве всего 10-20%, 50-60% малодоступны, а 20-40% совершенно недоступны.

Степень потребления фосфора растением в конкретный день определяется его

потребностью. В модели SWIM потребление фосфора культурами рассчитывается следующим образом:

$$DEM(t) = CPB(t)BT(t) - CPB(t-1)BT(t-1) \quad (5)$$

где PDEM – потребность растения в фосфоре, CPB – оптимальное содержание фосфора в биомассе кг/га, рассчитываемое по формуле (6)

$$PB = (BP_1 - BP_2) \left(1 - \frac{IHUP}{IHUP + \exp(SP_1 - SP_1 \cdot IHUP)} \right) + BP_3 \quad (6)$$

где BP1 – BP3 – содержания фосфора в биомассе в начале роста, в середине созревания и при полном созревании, SP – параметры формы, IHUP – параметр, выражающий накопленное к моменту расчета тепло [24].

3.4. Миграция фосфорных соединений с талым стоком

Фосфор в снежном покрове накапливается в течение всего зимнего периода, поэтому при начале снеготаяния весь накопленный фосфор в короткие сроки выносятся талыми водами. Согласно исследованиям [25] нагрузка фосфором непосредственно перед началом снеготаяния определялась на 750% больше, чем рассчитанная по начальным запасам и осадкам в течение зимы. Снеготаяние эрозионно малоопасно, поэтому фосфор в талом стоке в основном растворенный [26]. Первые 30% талой воды содержат 50-80% всех растворённых в-в, содержавшихся в снеге и называются йонным паводком. В некоторых исследованиях [27] наблюдался вынос 65% фосфора в 20% талого стока. Степень выноса ионов из снежного покрова пропорциональна скорости снеготаяния [28].

3.5. Трансформация фосфорных соединений в водотоках

Поступая в водоток из диффузных и точечных источников с поверхностным и подземным стоком, биогенные элементы попадают в систему, где живые и неживые компоненты взаимодействуют в условиях движущегося потока. Биогенные элементы подвергаются сорбции/десорбции из взвеси, поглощению микроорганизмами и водорослями в водной толще, осаждению со взвесями и отмершими организмами на дно, поступлению в поровые воды донных отложений [29]. Находясь в водной толще, биогенные элементы перемещаются вниз по течению с потоком, попадая в донные отложения, они остаются на месте, в поровых водах двигаются с меньшими скоростями.

Движение молекулы биогенного вещества в системе водоток – донные отложения, таким образом, напоминает спираль и потому называется спиралевидным циклом (nutrient spiraling) [30]. Этот процесс описывается длиной спирали, которую проходит молекула в растворенной форме и длиной, которую она проходит, возвращаясь в растворенное состояние. Длина перемещения молекулы в растворенной форме для фосфора существенно больше, поэтому она рассматривается как основной параметр.

Движение веществ в водном потоке обычно задается уравнением, включающим адвекцию, диффузию, боковой приток, адсорбцию во взвесь, поступление вещества из донных отложений, потребление водорослями и т.д. Ввиду замкнутости цикла преобразования фосфора в системе водоток-донные отложения, в масштабе короткого участка реки нет необходимости рассматривать все преобразования фосфора. Адвекция, диффузия и боковой приток принимают смысл общего притока фосфора к участку. Вместо комплекса биохимических процессов может быть достаточно ограничиться процессом поступления фосфора из донных отложений, который может быть описан так:

$$-k_c TP = \frac{v_f TC (T_w - 20)}{h} TP \quad (7)$$

где k_c – коэффициент поглощения, TP – валовая концентрация фосфора, TC – фактор коррекции температуры, T_w – температура воды, h – глубина, v_f – коэффициент переноса, равный отношению средней скорости и глубины потока к S_w – длине перемещения в растворенной форме по спиральному циклу.

Выводы

Анализ процессов круговорота фосфора позволяет сделать следующие выводы:

1. Основным источником фосфора, поступающего в речную сеть, служит внесение неорганических и органических удобрений. Объемы и хронология их поступления в почву могут быть определены как в соответствии с расписанием внесения, так и по средним значениям показателей дефицита фосфора в зависимости от типа почвы и вида культуры.

2. Фосфор в почвенном профиле поступает из раствора в водный сток и подземные воды. При описании процессов трансформации фосфора в почвенном профиле важно разделить растворенный, активный минеральный, стабильный минеральный,

органический, свежий органический фосфор. Важнейшими потоками являются адсорбция (между активной и стабильной формой) и минерализация (между органическим фосфором и минеральным растворенным). Адсорбция описывается изотермами Ленгмюра с параметрами, определёнными опытным путем для конкретного типа почвы. Минерализация фосфора определяется соотношением биогенных элементов в органическом веществе, температурой и влажностью почвы.

3. В паводочном стоке доля взвешенного фосфора невелика в силу незначительной эродирующей способности потоков талых вод, поэтому определяющей становится растворённая форма. Количество эродированной почвы определяется по формуле USLE.

4. Поступая в речную сеть, фосфор потребляется биотой, адсорбируется на взвеси и оседает в донных отложениях. Это приводит к его скачкообразной миграции вниз по течению. Здесь определяющим процессом становится обмен между водной толщей и донными отложениями.

Описанные выше процессы должны быть учтены при построении алгоритма фосфорного блока модели ЕСОМАГ. Азотный и фосфорный блоки модели должны быть увязаны между собой, так как, например, соотношение между азотом и фосфором в растительном опаде является фактором, влияющим на минерализацию свежего органического вещества.

Библиографический список

1. **Даценко Ю.С.** Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. – М.: ГЕОС, 2007. – 252 с.
2. **Мотовилов Ю.Г.** Свидетельство о гос. рег. в Роспатенте № 2013610703. ЕСОМАГ. Россия, 2013.
3. **Фащевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г.** Моделирование процессов азотного цикла на речном водосборе. Ч. I. Источники поступления азота и процессы азотного цикла. // Вода химия и экология. – 2017. – № 3. – С. 15-26.
4. **Ковда В.А.** Биогеохимия почвенного покрова. – М.: «Наука», – 1985.
5. **Савенко В.С., Савенко А.В.** Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. – 2007. – 248 с.
6. **Боброва С.А., Мальченко Ю.А.** Потоки биогенных форм фосфора с атмосферными осадками в 2013 году / Междуна-

рная научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Ломоносов – 2014». Тезисы докладов. – Севастополь: ООО «Экспресс-печать», 2014. – С. 50.

7. **Hongzhang K.** и др. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants. // Ann. For. Sci. 2010. Т. 67, № 67. С. 811.

8. **Со́йер К.** Фосфор и экология / перевод **Богомолова Е.М.** / в кн. Фосфор в окружающей среде. – М.: МИР, 1977. – С. 688-705.

9. **Емельянова Е.Н.** Аспекты управления водным хозяйством: эффективный и ценосберегающий способ удаления фосфора из бытовых сточных вод // Известия Челябинского научного центра. Т. 1. – 2005. – № 1 (27). Т. 1. – С. 72-76.

10. **Van Es H.M.** Soil and Water Quality: An agenda for Agriculture // Journal of Environment Quality. Washigton D.C.: National academy Press. – 1995. – Т. 24, № 2. – 386 с.

11. Рекомендации по использованию органических, минеральных макро- и микроудобрений, мелиорантов для выполнения обязательных мероприятий по улучшению земель сельскохозяйственного назначения в Ростовской области. <http://refdb.ru/look/1107049.html>

12. **Горбунов Н.И.** Минералогия и коллоидная химия почв. – М.: Наука, 1974. – 314 с.

13. **Yuan Y.F.D.** и др. Phosphorus component in ANN AGNPS. // Transactions of the ASAE. 2005. Т. 48(6), № 6. 2145-2154 с.

14. **Wolf J. Janssen B.H., and Luthwell D.J. W.C.T. de.** Modeling Long-Term Crop Response to Fertilizer Phosphorus. I. The Model. // Agronomy Journal. Т. 79. – 1987. – № 3. – С. 445-451.

15. **Матыченков И.В., Пахненко Е.П.** Изменение содержания подвижных фосфатов почвы при внесении активных форм кремния // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 3 (23). – С. 24-28.

16. **Аскинази Д.Л.** Фосфатный режим и известкование почв с кислой реакцией. – М.–Л.: АН СССР, 1949. – 216 с.

17. **Крейер К.Г., Петрова О.А.** Использование параметров сорбции-десорбции ионных форм элементов минерального питания растений для оценки агрохимического состояния дерново-поззолистых почв // Вестник СПбГУ. Серия 3. Биология. – 2006. – № 1. – С. 190-199.

18. **Jones C.A.** и др. A Simplified Soil and Plant Phosphorus Model: I. Documentation1 // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1984. Т. 48, – № 4. – С. 800.

19. **Wendt R.C., Alberts E.E.** Estimating Labile and Dissolved inorganic Phosphate Concentrations in Surface Runoff // Journal of Environmental Quality. 1984. – Т. 13, № 4. – С. 613-618.

20. **Хрисанов Н.И., Осипов Г.К.** Управление эвтрофированием водоёмов. – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 276 с.

21. **Bechmann J. Deelstra, H.O. Eggestad M.** Monitoring erosion and nutrient losses at catchment scale in Norway // Snowmelt erosion and related problems. Book of Abstracts. – 2001.

22. **Смирнова Л.Г. Шамарданова Е.Ю., Нарожная А.Г.** Сравнение двух методов расчета смыва почвы на водосборах с применением гис-технологий // НТП: земледелие и растениеводство. Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 9. – С. 10-12.

23. **Белолобцев А.И.** Регулирование режимов защиты почв от эрозии в адаптивно-ландшафтном земледелии Нечерноземной зоны: автореферат диссертации доктора сельскохозяйственных наук. 06.01.01. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 1993.

24. **Valentina Krysanova F.W.** Soil and Water Integrated Model: User Manual. Version: SWIM-8. Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2000.

25. **Jones H.G., Sochanska W.** The chemical characteristics of snow cover in a boreal forest snowcover during the spring runoff // Ann. Glaciol. 1985. – Т. 7. – С. 167-174.

26. **Jensen T.** и др. Spring Snowmelt Impact on Phosphorus Addition to Surface Runoff in the Northern Great Plains // Better Crops. – 2011. – Т. 95, № 1. – С. 28-31.

27. **Zapf-Gilje S.O. Russell and D.S. Mavinic R.** Concentration of Impurities During Melting Snow Made From Secondary Sewage Effluent // Water Science and Technology. – 1986. – № 18. – С. 151-156.

28. **Cragin J.H., Colbeck S.C., Hewitt A.D.** Elution of ions in Melting snow. Chromatographic versus Metamorphic mechanisms. 1993.

29. **Mc Coll R.H.S.** Self-purification of small freshwater streams: Phosphate, nitrate, and ammonia removal. // New Zeal. J. Mar. Freshw. Res. – 1974. – Т. 8, № 2. – С. 375-388.

30. **Marce R., Armengol J.** Modeling nutrient in-stream processes at the watershed scale using Nutrient Spiralling metrics // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2009. – № 13. – С. 953-967.

Материал поступил в редакцию 12.10.2017 г.

Сведения об авторах

Ясинский Николай Сергеевич, аспирант кафедры Метеорологии и климатологии; РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева; 125550, г. Москва, Тимирязевская д. 49.; тел.: 8(977)6473160, e-mail: jasen.y@mail.ru

Даценко Юрий Сергеевич, доктор географических наук, доцент кафедры Гидрологии суши, МГУ им. М.В. Ломоносова; 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д.1, Главное здание, Сектор «А», тел.: 8(495)9391533, e-mail: yuri0548@mail.ru

N.S. YASINSKY

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

YU.S. DATSENKO

Moscow state university named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russian Federation

REGULARITIES OF FORMATION OF RIVER FLOW PHOSPHORUS AIMED AT HYDROLOGICAL SIMULATION

Phosphorus is one of the elements which determines soil fertility and limits eutrophication of water bodies. At present there are a lot of models describing phosphorus inflow and transformation, however there is no such model in Russia. In this article there are described inputs in the watershed, transformation and inflow of phosphorus into water bodies in accordance with modern scientific theories of the phosphorus cycle. There are singled out processes influencing a phosphorus concentration in water bodies. Methods of elements estimation of phosphorus cycle are given which can be used when developing a formation blocklette of phosphorus runoff for improvement of the hydrological physical – mathematical model ECOMAG which has been repeatedly used in different regions of Russia for an estimation of the water flow.

Phosphorus, ECOMAG, river flow modeling, soil erosion, eutrophication

Reference list

1. **Datsenko Yu.S.** Evtrofirovaniye vodohranilishch. Gidrologo-gidrohimicheskie aspekty. Moskva: GEOS, 2007. S.252
2. **Motovilov Yu.G.** Svitdetel'jstvo o gos. reg. v Rospatente № 2013610703. ECOMAG. Rossiya, 2013.
3. **Fashchevskaya T.B., Motovilov Yu.G.** Modelirovaniye protsessov azotnogo tsikla na rechnom vodosbore. Chast I. Istochniki postupleniya azota i protsessy azotnogo tsikla. // Voda, himiya i ekologiya. 2017. № 3. S. 15-26.
4. **Kovda V.A.** Biogeohimiya pochvennogo pokrova. Moskva: «Nauka», 1985.
5. **Savenko V. S., Savenko A.V.** Geohimiya fosfora v global'nom gidrologicheskom tsikle. 2007.S.248.
6. **Bobrova S.A., Maljchenko Yu.A.** Potoki biogennyh form fosfora s atmosferynymi osadkami v 2013 godu. // Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya molodyh uchenyh, aspirantov i studentov «Lomonosov – 2014». Tezisy dokladov. – Sevastopol: OOO «express-pechat», 2014. – S. 50.
7. **Hongzhang K.** i dr. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants. // Ann. For. Sci. 2010. T. 67, № 67. S. 811.
8. **Soyer K.** Fosfor i ekologiya / perevod Bogomolova E.M. // v kn. Fosfor v okruzhayushchej srede. – M: MIR, 1977. S. 688-705.
9. **Emeljyanova E.N.** Aspekty upravleniya vodnym hozyajstvom: effektivny i tse-nosoberegayushchij sposob udaleniya fosfora iz bytovyh stochnyh vod // Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra. 2005. T. 1, № 1 (27). S. 72-76.
10. **Van Es H.M.** Soil and Water Quality: An agenda for Agriculture // Journal of Environment Quality. Washigton D.C.: National academy Press, 1995. T. 24, № 2. 386 c.
11. Rekomendatsii po ispol'zovaniyu organicheskikh, mineralnyh makro – i mikroudobrenij, meliorantov dlya vypolneniya obyazatel'nyh meropriyatij po uluchsheniyu zemel sel'skohozyajstvennogo naznacheniya v Rostovskoj oblasti. <http://refdb.ru/look/1107049.html>
12. **Gorbunov N.I.** Mineralogiya i kolloidnaya himiya pochv. M.: Nauka, 1974.
13. **Yuan Y.F.D.** i dr. Phosphorus component in ANN AGNPS. // Transactions of the ASAE. 2005. T. 48(6), № 6. 2145-2154 c.
14. **Wolf J. Janssen B.H.,** and Luthwell D.J. W.C.T. de. Modeling Long-Term Crop Response to Fertilizer Phosphorus. I. The Model. // AgronomyJournal. 1987. T. 79, № 3. C. 445-451.
15. **Matychenkov I.V. Pannenkov E.P.** Izmeneniye sodержaniya podvizhnyh fosfatov pochvy pri vnesenii aktivnyh form kremniya // Vestnik Ul'yanovskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. 2013. № 3 (23).
16. **Askinazi D.L.** Fosfatnyy rezhim i investirovaniye pochv s kisloy reaktsiej. M., L.: AN SSSR, 1949. – S.216.
17. **Kreijer K.G., Petrova O.A.** Ispol'zovaniye parametrov sorbtsii-desorbtsii ionnyh form elementov mineral'nogo pitaniya rastenij dlya otsenki agrohimicheskogo sostoyaniya dernovo-podzolistykh pochv // Vestnik SPbGU. Seriya 3. Biologiya. – 2006. – № 1. – S. 190-199.
18. **Jones C.A.** i dr. A Simplified Soil and Plant Phosphorus Model: I. Documentation1 // Soil Sci. Soc. Am. J. 1984. T. 48, № 4. S. 800.
19. **Wendt R.C., Alberts E.E.** Estimating Labile and Dissolved inorganic Phosphate Concentrations in Surface Runoff // Journal of Environmental Quality. 1984. T. 13, №№ 4. S. 613-618.
20. **Hrisanov N. I., Osipov G.K.** Upravleniye evtrofirovaniem vodoemov. SPb: Gidrometeoizdat, 1993. – S.276.
21. **Bechmann J. Deelstra, H.O. Eggestad M.** Monitoring erosion and nutrient losses at catchment scale in Norway // Snowmelt erosion and related problems. Book of Abstracts. 2001.
22. **Smirnova L.G., Shamardanova E.Yu., Narozhnaya A.G.** Sravneniye dvuh metodov rascheta smyva pochvy na vodosborah s primeneniem gistehnologij // NTP: zemledeliye i rastenievodstvo. Dostizheniya nauki i tehniki APK. 2012. – № 9. – 10-12,
23. **Belolyubtsev A.I.** Regulirovaniye zashchity pochv ot erozii v adaptivno -landshaftnom zemledelii Nechernozemnoj zony: avtoreferat dissertatsii doktora sel'skohozyajstvennyh nauk. 06.01.01. M.: RGAU-MSHA im. K.A. Timiryazeva, 1993.
24. **Valentina Krysanova F.W.** Soil and Water Integrated Model: User Manual. Version: SWIM-8. Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2000.
25. **Jones H.G., Sochanska W.** The chemical characteristics of snow cover in a boreal forest snowcover during the spring run-off // Ann. Glaciol. 1985. T. 7. C. 167-174.
26. **Jensen T.** i dr. Spring Snowmelt Impact on Phosphorus Addition to Surface Runoff in the Northern Great Plains // Better Crops. 2011. T. 95, №№ 1. S. 28-31.

27. **Zapf-Gilje S.O.** Russell and D.S. Marvinic R. Concentration of Impurities During Melting Snow Made From Secondary Sewage Effluent // Water Science and Technology. 1986. № 18. С. 151-156.

28. **Cragin J.H., Colbeck S.C., Hewitt A.D.** Elution of ions in Melting snow. Chromatographic versus Metamorphic mechanisms. 1993.

29. **Mc Coll R.H.S.** Self-purification of small freshwater streams: Phosphate, nitrate, and ammonia removal. // New Zeal. J. Mar. Freshw. Res. 1974. Т. 8, № 2. С. 375-388.

30. **Marce R., Armengol J.** Modeling nutrient in-stream processes at the watershed scale using Nutrient Spiralling metrics // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2009. № 13. С. 953-967.

The material was received at the editorial office
12.10.2017

Information about the authors

Yasinsky Nikolaj Sergeevich, post graduate student of the chair Meteorology and climatology RGAU-MAA named after С.А. Timiryazev. 125550, Moscow, Timiryazevskaya, d.49.; tel.: 8(977)6473160, e-mail: jasen.y@mail.ru

Datsenko Yuriy Sergeevich, doctor of geographic sciences, associate professor of the chair Hydrology of land, MSU named after M.V. Lomonosov; 119991, Moscow, GSP-1, Leninskie gory, MSU, d. 1, Main building, Sector «А», tel.: 8(495)9391533, e-mail: yuri0548@mail.ru

УДК 502/504:551.49

З.К. ИОФИН, Г.В. ВОЗОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный технический университет, г. Вологда, Российская Федерация»

ОЦЕНКА ПОДЗЕМНОГО ВОДООБМЕНА В БАССЕЙНАХ РЕК

Предпринята попытка оценки величины подземного водообмена между соседними бассейнами рек. Подземный водообмен включен М.А. Великановым в уравнение водного баланса и с момента появления этого уравнения величину подземного водообмена в водном балансе никто не анализировал. Подземный водообмен осуществляется в зоне активного водообмена, который определяется глубиной базиса эрозии регионального водотока. В гидрологии принят постулат о том, что водосборный бассейн какой-либо реки состоит из поверхностного и подземного водообменов. Однако, благодаря гидрогеологическим особенностям, в общем случае поверхностный и подземный водосборы не совпадают. Но так как определение границы подземного водосбора осуществить практически очень сложно, то за величину речного бассейна принимается только поверхностный водосбор. Несовпадение поверхностного и подземного водосборов наблюдается у малых рек и рек, у которых из-за геологических условий происходит активный водообмен между бассейнами. Величина водообмена с увеличением площади водосбора убывает, поэтому для достаточно больших речных бассейнов можно считать, что подземный водообмен приближается к нулю. Подземное питание реки пополняется из зоны дренирования руслом реки. В случае водообмена с соседним бассейном подземное питание реки будет возрастать на величину дренируемого водообмена и по сравнению с зональной величиной подземный сток в реку будет увеличен. В данной статье авторами исследуется уравнение водного баланса, предложенное М.А. Великановым. Такое представление уравнения водного баланса отличает М.А. Великанова от других авторов. Для поставленной цели, используя расчеты по линейно-корреляционной модели, выполнена ориентировочная оценка средней величины подземного водообмена для бассейнов рек Вологодской области, Восточной Кубы, Италии.

Зона активного водообмена, поверхностный и подземный водообмен, линейно-корреляционная модель, слой инфильтрации, слой впитывания в почву, уравнение водного баланса, водосборные площади поверхностного и подземного стоков.

Введение. Среди существующих уравнений водного баланса выделяются по своей структуре две группы: уравнение, предло-

женное М.А. Великановым (1), и уравнения ряда авторов, не включающих слой подземного водообмена. Наиболее обоснованной струк-