

УДК 502/504:504.4.06

Л. Д. РАТКОВИЧ, В. Н. МАРКИН, И. В. ГЛАЗУНОВА, С. А. СОКОЛОВА

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

ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ ДИФFUЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Исследуются факторы диффузного загрязнения водных объектов. Дана классификация источников загрязнения водных объектов. Классифицированы факторы загрязнения диффузионных стоков с сельхозугодий и режим вымывания веществ из почвы. Сделан аналитический обзор влияния сельскохозяйственных угодий на загрязнение водных объектов путем выделения причинно-следственных связей. Приведена зависимость водообмена между почвенными и грунтовыми водами при изменении глубины залегания грунтовых вод. Получены примеры зависимости изменения водообмена на нетронутых, орошаемых и осушаемых землях. Анализируется вынос загрязнений в зависимости от вида сельскохозяйственного использования и урожайности. Предложена методика оценки объема диффузных стоков с сельхозугодий. Показана схема мероприятий по снижению загрязнения водных объектов диффузионными стоками с сельскохозяйственных угодий. Рассмотрена методика оценки эффективности водоохраных мероприятий на основе сопоставления коэффициентов предельного загрязнения. Представлена блок-схема использования программного комплекса для расчета диффузного загрязнения с сельскохозяйственных земель. Показаны результаты модельных экспериментов применительно к речному бассейну реки Каруп в Дании. Река Каруп является жизненно важной артерией для земледельческих районов. В долине реки Каруп расположено множество сельхозугодий, мелиорация которых осуществляется с использованием речного стока. Иллюстрируется распределение концентраций загрязняющих веществ в корневом слое, зоне аэрации и зоне насыщения рассматриваемого участка. Сформулированы направления дальнейших исследований. В качестве инструментария для получения объективной картины комплексного загрязнения, включая наиболее сложную, диффузную составляющую, рекомендуются применение сложных моделей, таких как программный пакет MIKE by DHI.

Диффузные источники загрязнения, сельскохозяйственные угодья, источники загрязнения вод, неорошаемые, орошаемые и осушаемые земли, возделываемые культуры, урожайность, эффективность водоохраных мероприятий, коэффициент предельного загрязнения, блок-схема программного обеспечения, имитационные расчеты с использованием компьютерных моделей, речной бассейн, концентрация загрязнений, корневой слой, ненасыщенная зона, зона насыщения.

Введение. Значение проблемы загрязнения водных объектов (рек, озер, морей, грунтовых вод и т. д.) настолько велико, что обоснование ее актуальности представляется осознанной необходимостью. Исследование диффузного загрязнения любого водного объекта неизбежно охватывает совокупность процессов взаимодействия поверхностных и подземных вод на водосборной территории с режимом антропогенного влияния. Сложность учета физики процессов соответственно влияет на структуру применяемых имитационных моделей. Кроме того, конечная цель моделирования – это создание набора сценариев природоохранных мероприятий с целью снижения нашего воздействия на природ-

ную среду, сохраняя целесообразность и эффективность хозяйственной деятельности. Объектом рассмотрения обычно является водосбор, как территориальная единица, объединяющая локальные ландшафты. В научных исследованиях и проектной практике математическое моделирование является наиболее эффективным инструментом для анализа процессов диффузного загрязнения водных объектов и водных экосистем.

Наиболее объективный и подробный анализ применения математических моделей для количественной оценки диффузного загрязнения выполнен в аналитическом обзоре Михайлова С. А. [1]. Отмечается, что работоспособность

математических моделей для неточечных источников обусловлена необходимостью формирования множественной информации о параметрах изучаемой системы и показателях ее состояния. В их числе важно выделить константы, переменные процесса и состояния системы. Параметры системы и показатели ее состояния включают размеры водосбора, орографию, водопроницаемость водосбора и его участков, влагоемкость поверхности водосбора, характеристики почв (текстура, проницаемость, эрозионная опасность), растительный покров, каналы и водостоки, системы канализации и естественные дренажные характеристики, адсорбирующая способность взвешенных веществ, характеристики водного баланса территории.

Как в плане инженерной постановки, так и с математической точки зрения проблема моделирования распределенных источников является более сложной, чем в случае сосредоточенных источников загрязнения. Даже в простейшей схеме моделирования диффузного загрязнения «река – водосбор» требуется двумерное представление. Процесс распределения концентраций загрязняющего вещества в водном объекте по двум координатам описывается дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных. При моделировании рассредоточенной нагрузки приходится одновременно проводить расчеты и самой нагрузки, и русловых течений и параметров, определяющих качество воды.

Сельскохозяйственное производство, расположенное на больших площадях угодий, является активным и масштабным источником диффузного загрязнения водных объектов. Несмотря на значительный опыт в изучении вопросов формирования стока и взаимодействия поверхностных и подземных вод и их качества, роль диффузной составляющей в загрязнении поверхностных водных объектов изучена недостаточно. Различаются подходы к определению массы загрязнений, поступающих в водные объекты с сельскохозяйственных водосборов, и оценке их воздействия на качество поверхностных вод. Недостаточно изучены территориальные особенности формирования диффузного стока. Нуждаются в дополнительных исследованиях вопросы нормирования антропогенного воздействия на речные водосборы с

доминирующим сельскохозяйственным использованием [2, 3].

Материалы и методы исследований. Существенным моментом исследований в рассматриваемой области является решение масштабной научно-практической задачи, начиная с гидролого-гидрогеологических аспектов [4] до разработки комплексных водоохраных мероприятий с оценкой эффективности последних.

В качестве действующего программного пакета авторами использовалась универсальная система гидрологического моделирования MIKESHE, в основу которой положена модель Европейской гидрологической системы SHE (System Hydrologique European – Разработчик – DHI Water & Environment (Дания)). MIKE SHE является физико-математической моделью с распределенными параметрами. Модель учитывает задержание осадков растительностью, эвапотранспирацию, снеготаяние, склоновый и русловый сток, движение воды в ненасыщенной и насыщенной зонах, миграцию загрязняющих веществ с сельскохозяйственных угодий.

Схема поступления загрязнений в водный объект достаточно прозрачна (рис. 1). Очевидно, интенсивность проявления разных факторов зависит от конкретных особенностей водосбора. Для удобства анализа на рисунке 2 дана классификация источников загрязнения по трем показателям - происхождению, продолжительности и режиму воздействия. Классификация дополнена также описанием носителей и видов загрязняющих веществ.



Рис. 1. Схема поступления загрязняющих веществ в подземные горизонты

Анализ факторов, влияющих на загрязнение водных объектов стоками с сельскохозяйственных угодий. Сельское



Рис. 2. Происхождение и характер источников загрязнения вод

хозяйство является основным источником загрязнения природных вод удобрениями и ядохимикатами. В районах развитого земледелия оно становится определяющим. В среднем с одного гектара пашни может выноситься в год до 80 кг нитратного азота, 3 кг фосфора и 60 кг калия, в зависимости от типа почв, количества и характера выпадающих осадков, вида растений, дозы удобрений [5].

Поверхностные и подземные (в первую очередь грунтовые воды) водные объекты являются непосредственными приемниками вымываемых с сельскохозяйственных угодий веществ. Грунтовые воды питают поверхностные водные объекты, в том числе реки, наиболее интенсивно используемые в хозяйственной деятельности и как следствие, характеризующиеся неудовлетворительным качеством воды. Таким образом, проявляется опосредованное влияние сельскохозяйственного производства на окружающую среду.

Состав загрязнителей, которые вымываются из почв, и их роль в загрязнении водоисточников зависит от ряда факторов, в том числе свойств загрязняющих ингредиентов. К характерным загрязнителям относятся следующие элементы и

соединения: соединения азотной группы (в первую очередь нитратный и аммонийный азот); калий; фосфор; растворенные органические вещества; сульфаты; хлориды и др. Высокой подвижностью в почве обладают отрицательно заряженные ионы, например, нитратный азот, сульфаты и хлориды. Они выносятся с поверхностным и подземным стоком. Так, средняя миграционная способность нитратов (по Лавриченко В. М) доходит до одного метра в год. Подвижность фосфатов ограничена их слабой растворимостью в воде и составляет несколько сантиметров в год. Нуждается в совершенствовании нормативная основа, регламентирующая качество воды в водных объектах, и в ряде случаев противоречивая [6–10].

Режим попадания загрязняющих веществ в водные объекты определяется первопричиной и способствующими факторами. Причиной вымывания веществ является поступление воды на почву при выпадении дождей, таянии снега и орошении. При этом формируются поверхностный и подземный сток в соотношении, определяющемся количеством и интенсивностью осадков, инфильтрационной

способностью грунтов, испарением.

С учетом изложенного можно укрупненно сформулировать естественные и антропогенные факторы (табл. 1), определяющие режим вымывания загрязняющих веществ из почвы:

содержание загрязняющих веществ в почве;

пространственное положение и мощность зоны аэрации;
водно-физические характеристики почво-грунтов;
условия сельскохозяйственного использования;
режим мелиоративного воздействия;
рельеф местности.

Таблица 1

Факторы загрязнения диффузных стоков с сельскохозяйственных угодий

Климатические	Почвенные	Гидрологические	Гидрогеологические	Агрохимические	Агротехнические	Биологические	Гидромелиоративные
- осадки - испарение - сумма положительных температур - снеготаясы - интенсивность снеготаяния	- тип почв - гранулометрический состав - содержание гумуса - подверженность эрозии - плотность агрегатов и межагрегатное сцепление - коэффициент уплотнения - влажность почвы	- рельеф территории водосбора - уклон водосбора - структура землепользования на водосборе - озерность - залесенность - заболоченность - модуль поверхностного стока	- глубина залегания грунтовых вод - коэффициент фильтрации - модуль подземного стока	- система удобрений - средства защиты растений - средства химической мелиорации почв	- система обработки почвы - используемая сельскохозяйственная техника	- вид с./х. культур - тип и вид севооборота	орошение: - способ полива - интенсивность подачи воды - оросительные нормы - режим подачи воды - вторичное засоление осушения: - норма осушения - глубина заложения дренажа

Названные позиции подробно рассмотрены авторами данной статьи. Содержание загрязняющих веществ в почве зависит от типа почв (естественного почвенного плодородия), режима внесения удобрений, включая дозы и сроки внесения, формирующие фактическое плодородие, вида выращиваемых растений (влияет на микрофлору, количество корневых и пожнивных остатков).

Пространственное положение и мощность зоны аэрации определяет скорость инфильтрации и соответственно интенсивность водообмена почвенных и грунтовых вод. Характер зависимости водообмена между почвенными и грунтовыми водами при изменении глубины залегания грунтовых вод (осредненные данные по ряду объектов) приведены на рисунке 3. Положительное значение величины водообмена свидетельствует об инфильтрации воды, отрицательное – о пополнении запасов почвенных вод со стороны грунтовых. Наиболее опасной с точки зрения загрязнения грунтовых вод, является глубина их залегания около 1 м и больше, когда в среднем за декаду преобладает инфильтрационный поток над испарением с поверхности грунтовых вод.

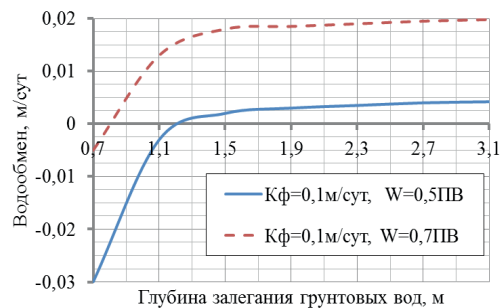


Рис 3. Интенсивность водообмена между почвенными и грунтовыми водами при изменении глубины залегания грунтовых вод и влажности

Водно-физические характеристики почвы определяют, наряду с рельефом местности, долю поверхностного и подземного стока. Водно-физические характеристики почв определяют их инфильтрационную способность. Характерно гиперболическое очертание кривых зависимости водообмена от влажности почвы (рис. 4).

Условия сельскохозяйственного использования угодий, обусловлены в первую очередь видом выращиваемых культур.

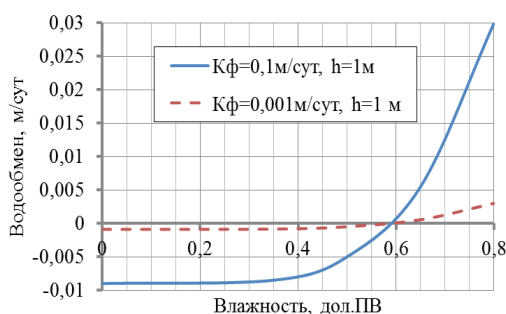


Рис. 4. Зависимость водообмена между почвенными и грунтовыми водами от влажности почвы при фиксированных значениях глубины залегания уровня грунтовых вод h и коэффициента фильтрации K_{ϕ}

Объем вымыва веществ из почвы на черном пару вдвое больше, чем с угодий под картофелем и примерно в четыре раза больше, чем с севооборота зерновых. Интегральный показатель сельскохозяйственной деятельности, урожайность культур непосредственно связан с агротехникой — системой приёмов возделывания культурных растений. Современная агротехника направлена на сохранение почвенного плодородия, защиту почв от эрозии. Зависимость объемов выноса от урожайности культур можно представить линейной зависимостью. Стремление повысить урожайность приводит к необходимости повышения уровня агротехники. Разбивая урожайность по уровню агротехники на три группы (низкий уровень, средний и высокий), можно установить ее влияние на вымыв веществ из почвы [6]. Таким образом, повышение уровня агротехники, связанное с повышением плодородия почв, приводит к увеличению содержания питательных веществ в почве (и других веществ, в том числе пестицидов), что увеличивает опасность их вымывания в водные объекты. Очевидно, следует создавать условия, снижающие потери веществ, в частности, медленнодействующие удобрения.

Режим мелиоративного воздействия.

Мелиоративные мероприятия, в частности гидротехнические, увеличивают энергонасыщенность гектара угодий, усиливая давление на природные ландшафты, в частности увеличивая объемы вымыва веществ из почвы. Так, осушение земель повышает дренированность территории и увеличивает объемы вымыва веществ из

почвы. Связано это с поддержанием уровня грунтовых вод в пределах (0,6...1,0) м по сравнению с заболоченными луговыми угодьями, где их глубина (0,3...0,7) м. Влажность почвы также стабилизируется (если не учитывать влияние осадков). При этом режим испарения (не осушенные земли) грунтовых вод переходит в инфильтрационный (при осушении).

Орошение увеличивает количество поступающей на угодья воды. При этом дождевание, как наиболее распространённый способ полива в России, увеличивает подземную составляющую стока, так как образование поверхностного стока не допускается. Орошение увеличивает потери веществ из почвы, по сравнению с богарными условиями, в 1,5...2,5 раза.

Влияние рельефа местности проявляется, главным образом, через уклон. Водно-эрозионные процессы начинаются при уклонах в 3° и усиливаются при уклонах 5...6 градусов. Возрастает объем взвешенных частиц вместе с сорбированными веществами, в том числе фосфором.

Формализация объемов диффузных стоков. Для приближенной оценки ситуации можно использовать эмпирические подходы, принимая линейность связи между объемом веществ $V_{пв}$, выносимых с поверхностным стоком, с величиной стока, можно представить объем выноса в виде формулы (1).

$$V_{пв} = MG\sqrt{I}f(a, k_{\phi}), \quad (1)$$

где M — количества поступающей на почву воды; G — удельное содержание веществ в почве; a — показатель вида загрязняющего вещества; k_{ϕ} — коэффициент впитывания:

$$k = k_{\phi}[(\omega - \omega_0)(\Pi - \omega_0)]^n, \quad (2)$$

где ω — влажность почвы; k_{ϕ} — коэффициент фильтрации; ω_0 — влажность, при которой прекращается движение влаги в почве под действием капиллярных сил; Π — пористость почвы; n — коэффициент учитывающий тип почв ($n = 3,5...6$).

Рассуждая аналогичным способом, можно прийти к формуле:

$$V_{пс} = Mghf_1(a, k_{\phi}), \quad (3)$$

где h — мощность зоны аэрации; $f(a, k_{\phi})$, $f_1(a, k_{\phi})$ — функции, задающие размерность эмпирических формул в привязке к виду загрязняющих веществ.

Дальнейшее решение задачи в данной постановке связано с включением гидрологических характеристик водного объекта и нуждается в специальном рассмотрении.

Описание и теоретические основы интегрированной модели MIKE SHE. Рассматриваемый продукт — это интегрированная система моделирования

потоков поверхностных и грунтовых вод, транспорта растворов и взвесей во всей земной фазе гидрологического цикла. Определение водного баланса системы поверхностных/грунтовых вод, включающее описание динамики их взаимодействия, содержания воды в ненасыщенной зоне, процессов испарения и транспирации позволяет устанавливать наиболее точные граничные условия для этой системы. MIKE SHE является детерминистической моделирующей системой, описывающей реальные физические процессы решением отдельных дифференциальных уравнений.

Отличительными свойствами MIKE SHE являются:

мощные средства подготовки данных и представления результатов (оцифровка и интерполяция пространственной информации, графическое редактирование, встроенная ГИС и база данных почвенных свойств, процедура аппроксимации и генерализации геологических данных, возможности компьютерной анимации результатов моделирования);

управление шагами вычислений, увеличивающее точность расчетов и экономящее аппаратные средства и время, с помощью специальных математических процедур.

Модульная структура MIKE SHE делает ее применимой к различным временным и пространственным шкалам и к различным уровням сложности. Выбор сложности модели основывается на варьировании факторов, таких как доступность данных, размеры моделирующего объекта, тип и сложность проблемы, требуемая точность результатов, компьютерные возможности и экономическая целесообразность.

Моделирующая система MIKE SHE может быть применена практически к любому виду гидрологических проблем, а для некоторых проблем является единственным математическим средством:

прогноз влияния изменений в землепользовании с точки зрения водных запасов, затопления, почвенной эрозии;

анализ ирригационных схем;

запросы воды на ирригацию;

оценка потенциальной урожайности;

анализ мероприятий против засоления;

взаимодействие поверхностных и грунтовых вод: прогноз эффекта от использования грунтовых и поверхностных вод, прогноз воздействия ирригации и дренажа

на затопление и подтопление;

исследование качества вод, в которых необходимо детальное изучение водного баланса и скоростей потоков;

исследование риска загрязнений, в том числе диффузных, грунтовых вод и эффекта от проведения водоохранных мероприятий;

изменение структуры землепользования;

почвенная эрозия/перенос взвесей.

MIKE SHE применима к объектам различного масштаба, от простого профиля почвы до крупных регионов, которые могут включать бассейны нескольких рек.

В качестве отладочного расчетного примера при оценке диффузионных стоков с сельскохозяйственных угодий рассматривался речной бассейн реки Каруп в Дании. Река является жизненно важной артерией для сельскохозяйственных районов, находящихся в районе ее течения. В долине Каруп расположено множество сельхозугодий, мелиорация которых осуществляется с использованием речного стока.

Расчеты выполнены для 3-х видов сельскохозяйственных культур исходное – травы, зерновые (озимая пшеница, рис. 6) и кукуруза на зеленый корм, для условий богары (исходное) и орошения дождеванием на фоне дренажа для глубины заложения дренажа – 0,5, 0,8, 1,2 м. Такого рода исследования ранее не выполнялись.

Результаты исследований. В результате модельных экспериментов были получены графики накопления массы остатка загрязняющего вещества; карты концентраций; модуль расположения источника и пути потока частиц, движущихся в насыщенной зоне грунтовых вод. Возможности внешнего интерфейса модели демонстрируются на рисунках 5–7.

Следует отметить, что использование моделей данного типа сопряжено с кропотливой и многочасовой работой с исходным материалом. Поэтому формирование базы данных по речным бассейнам является важнейшей задачей, как в части научных исследований, так и в процессе подготовки студентов по направлению образования «Природообустройство и водопользование».

Для принятия решений по комплексу водоохранных мероприятий необходима

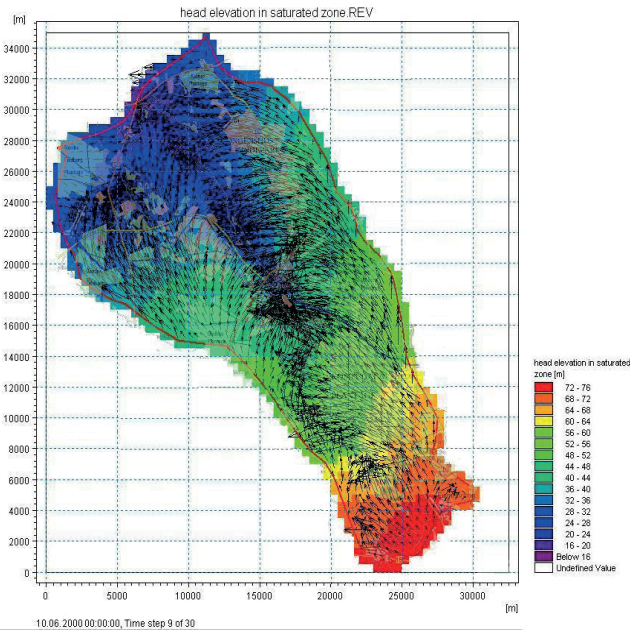


Рис. 5. Карта векторов изменения положения уровня грунтовых вод (УГВ) в соответствии с факторами естественного увлажнения и нормами орошения

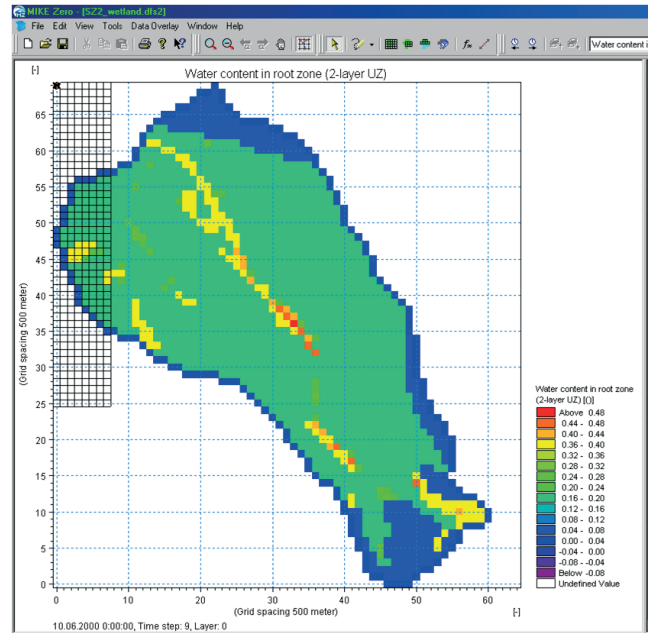


Рис. 6. Изменение содержания влаги в корнеобитаемом слое при загрузке севооборота зерновыми культурами (пшеница)

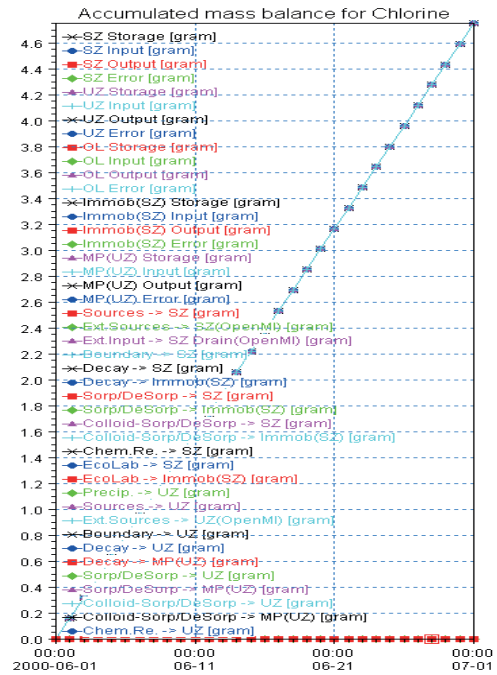
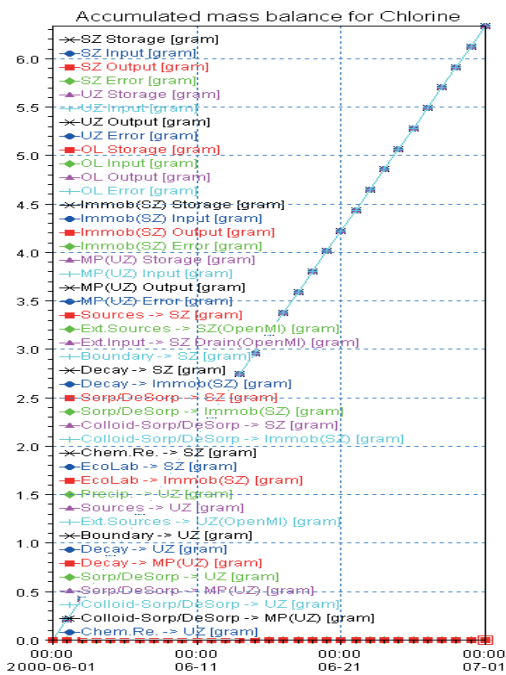


Рис. 7. Аккумулируемые массы (г/га) хлор-органических пестицидов во времени

разработка собственных приложений для интерпретации результатов имитационных экспериментов. Формальная, хотя и профессиональная статистическая обработка, не всегда приемлема. Требуется анализ стандартных результирующих форм для практического инженерного анализа, например для построения зависимостей, показанных на рисунке 8, а также для исследования взаимодействий поверхностных и подземных вод.

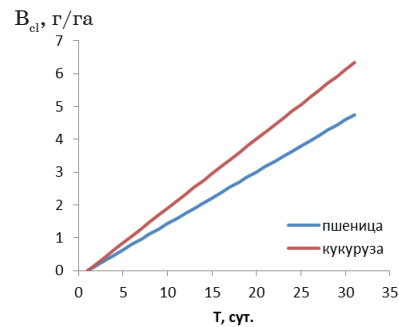


Рис. 8. Накопление остатков пестицидов C1 в корнеобитаемой зоне

Мероприятия по снижению загрязнения водных объектов диффузными стоками с сельскохозяйственных земель. Классифицируя водоохранные мероприятия, направленные против диффузного загрязнения,

стоит разделить мероприятия на связанные с формированием загрязняющих стоков и непосредственно воздействующие на водный объект. Схема мероприятий представлена на рисунке 9.

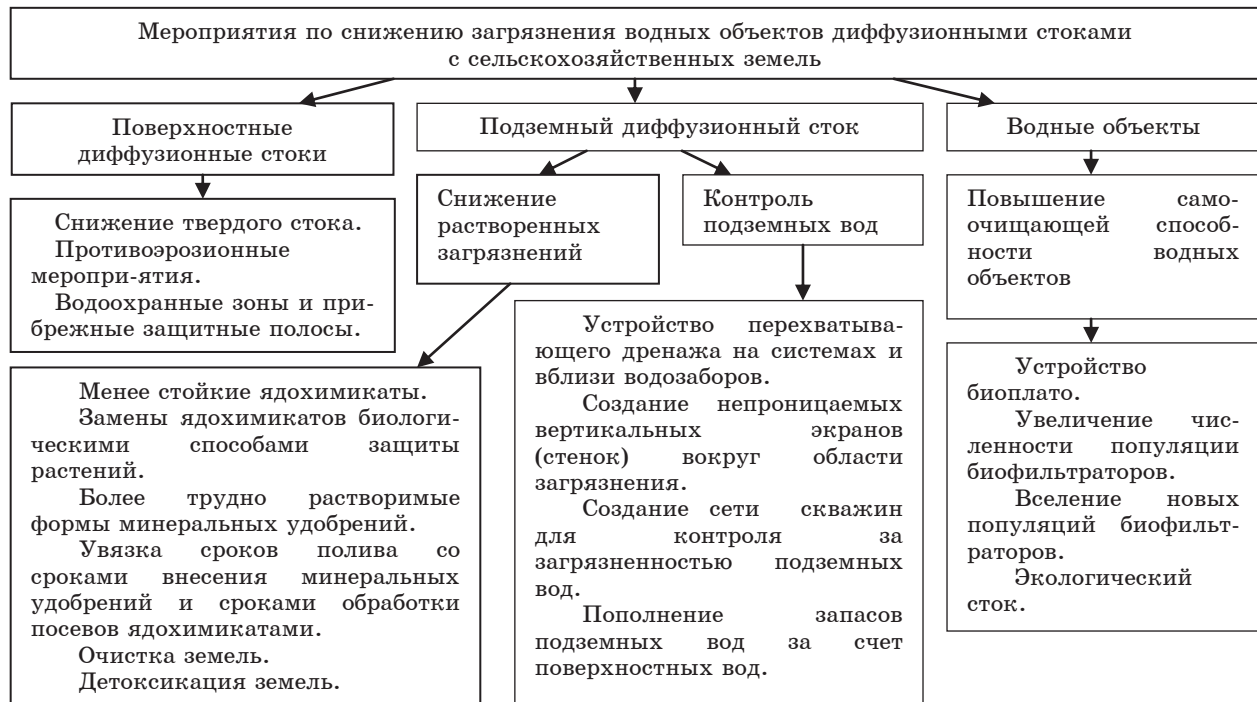


Рис. 9. Схема комплексных водоохранных мероприятий, направленных на предотвращение диффузного загрязнения водных объектов и сокращение последствий загрязнения

Планирование водоохранных мероприятий подразумевает определение показателей их эффективности, регулируя которые, следует добиться требуемого качества воды в реке. В качестве интегрального показателя можно использовать индекс загрязнений, либо его модификации. Наиболее удобным с точки зрения проектной практики по нашему мнению является коэффициент предельной загрязненности ($K_{во}^{пз}$) водного объекта [11]. В рамках методики сначала находятся соответствующие объемы предельного загрязнения $W_{пз}$, которые оцениваются для каждой группы отраслевых водопользователей с учетом ЛПВ (лимитирующего

показателя вредности).

$$W_{пзj} = K_{пзj} W_{ввj}, \quad (4)$$

где $K_{пзj} = (1/N_j) \sum_{i=1}^N (C_i / ПДК_i - 1)$; j – номер группы водопользователей из m учитываемых групп; i – номер загрязняющего вещества в группе из N учитываемых веществ.

Коэффициент предельного загрязнения для водного объекта оценивается в привязке к году обеспеченности p по формуле (5), что позволяет анализировать качество водных ресурсов по всему спектру водности в соответствии с таблицей 2 [11, 12]. $K_{во,р}^{пз} = [(\sum_{j=1}^m (W_{пзj} + W_{ввj}) / S_p)] - 1$, (5) где $W_{ввj}$ – возвратные воды j -ой группы водопользователей; S_p – балансовое значение объема стока в контрольном створе с учетом изъятия воды, возвратных вод, регулирования и потерь из водохранилищ.

Таблица 2

Классификация качества воды и состояния водных ресурсов по значениям индекса загрязнения и коэффициента предельного загрязнения

Показатель	Класс качества воды					
	1	2	3	4	5	6
ИЗВ	≤ 0,2	0,2...1	1...2	2...4	4...6	> 6
$K_{пз}$	≤ -0,8	-0,8...0	0...1	1...3	3...5	> 5

Классы качества воды: 1 – очень чистая; 2 – чистая; 3 – умеренно загрязненная; 4 – загрязненная; 5 – грязная; 6 – очень грязная.

Эффективность Э мероприятий может быть выражена через коэффициенты предельной загрязненности $K_{пз}$ и $K_{пз}^{вом}$ до и после проведения водохозяйственных и водоохраных мероприятий:

$$\Theta = [(K_{пз} - K_{пз}^{вом}) / K_{пз}] 100\% . \quad (6)$$

Выводы

Материалы исследований по теоретической и научно-практической составляющим проблемы диффузных загрязнений свидетельствует как о выраженной актуальности, так и необходимости развития методики расчета загрязнений в многолетнем разрезе. Методика должна быть ориентирована на многофакторное обоснование комплексных водоохраных мероприятий. Мероприятия классифицируются по месту их проведения: в источнике загрязнения; транзитной зоне и водном объекте. Существенным моментом в процессе обоснования мероприятий являются особенности формирования диффузных стоков различного происхождения. При этом сельское хозяйство является главным источником загрязнения природных вод удобрениями и ядохимикатами, особенно в районах развитого земледелия.

Максимально надежным инструментарием (в нашем случае датский пакет MIKE SHE) являются программные пакеты зарубежного и отечественного производства, корректно описывающие режим взаимодействия поверхностных и подземных вод, динамику формирования и переноса загрязняющих веществ в водные объекты.

В дальнейшем авторы планируют исследования в разрезе вариантов по природно-климатическим характеристикам; по типу мелиоративных систем; по видам орошения; по характеру мелиоративного воздействия; по мероприятиям на водосборе; по типам водоохраных мероприятий.

Библиографический список

1. Михайлов С. А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели: Аналит. обзор / СО РАН. ГПНТБ, Ин-т водных и экологич. проблем: Сер. Экология; вып. 56. – Барнаул: День, 2000. – 130 с.
2. Водогрецкий В. Е. Антропогенное изменение стока малых рек: монография. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 176 с.
3. Борисова Г. Г. Геоэкологические

основы управления диффузным стоком с сельскохозяйственных водосборов : дис. ... д-ра географ. наук: 25.00.36. – Екатеринбург, 2002. – 319 с.

4. Манукьян Д. А., Жабин В. Ф. Гидрогеоэкологические проблемы в задачах природообустройства: монография. – М.: МГУП, 2006. – 194 с.

5. Особенности гидрохимического режима вод гидрографической сети мелиорированных водосборов / В. С. Брезгунов [и др.] // Мелиорация переулаженных земель. – 1985. – Вып. XXXIII. – С. 80–89

6. Метод оценки качества вод и состояния водных экосистем в схемах КИОВР/ Шабанов В. В., Маркин В. Н. – М.: МГУП, 2007. – 81 с.

7. Методические указания по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (приказ Федеральное агентство по рыболовству от 4 августа 2009 года № 695) (Электронный ресурс). – URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2069452/> (Дата обращения 10.05.2016).

8. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты (приказ МПР РФ от 12 декабря 2007 г. № 328) (Электронный ресурс). – URL: <http://zakonbase.ru/content/base/115176> (Дата обращения 10.05.2016).

9. Методические указания по разработке нормативов предельно допустимых вредных воздействий на поверхностные водные объекты (приказ Минприроды РФ № 328 от 26 февраля 1999 г.) (Электронный ресурс). – URL: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/52/52467/index.htm> (Дата обращения 10.05.2016).

10. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей (приказ МПР № 333 от 17.12.2007) (Электронный ресурс). – URL: <http://www.promecovod.ru/tseny?id=75> (Дата обращения 10.05.2016).

11. Шабанов В. В., Маркин В. Н. Эколого-водохозяйственная оценка водных объектов. монография. – М.: МГУП, 2009. – 154 с.

12. Шабанов В. В., Вершинская М. Е., Маркин В. Н. Эколого-водохозяйственная оценка водосбора и водных объектов бассейна Иртыша // Материалы международной научно-практической конференции «Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК». – М.: МГУП, 2007. – С. 290–307.

Материал поступил в редакцию 29.04.2016.

Сведения об авторах

Раткович Лев Данилович, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Комплексное использование водных ресурсов и гидравлики»; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19; e-mail: levkivr@mail.ru.

Маркин Вячеслав Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «Комплексное использование водных ресурсов и гидравлики»; Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19; e-mail: mvnarkin@mail.ru.

Глазунова Ирина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Комплексное использование водных ресурсов и гидравлики»; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19; e-mail: ivglazunova@mail.ru.

Соколова Светлана Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Комплексное использование водных ресурсов и гидравлики»; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19; e-mail: sokolovasvetlana@mail.ru.

L. D. RATKOVICH, V. N. MARKIN, I. V. GLAZUNOVA, S. A. SOKOLOVA

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow

FACTORS OF INFLUENCE OF DIFFUSE POLLUTION ON WATER BODIES

There are investigated factors of diffuse pollution of water bodies. There is given a classification of sources of pollution of water bodies. Factors of pollution of diffusive flows from agricultural lands and a regime of matters washing out from the soil are classified. There is made an analytical survey of the influence of agricultural lands on contamination of water bodies by means of defining cause-and-effect relations. There is given a dependence of water exchange between soil and ground water at the change of the depth of ground water bedding. There are obtained examples of the dependence of the change of water exchange on untouched, irrigated and drained lands. There is analyzed a withdrawal of impurities depending on the type of agricultural usage and productivity. There is proposed a method of assessment of the volume of diffuse flows from agricultural lands. There is shown a scheme of measures on reducing contamination of water bodies by diffuse flows from agricultural lands. There is considered a method of assessment of the efficiency of water protection measures on the basis of comparison of coefficients of maximum pollution. There is presented a block-diagram of usage of a software complex for calculation of the diffuse pollution from agricultural lands. There are shown results of model experiments relating to the basin of the river Karup in Denmark. The Karup river is a vitally important artery for agricultural regions. In the valley of the Karup river a lot of agricultural lands are located the reclamation of which is fulfilled by a river runoff. Distribution of concentrations of pollutants in the root layer, aeration zone and zone of saturation of the considered part is illustrated. Directions of further investigations are formulated. As instruments for getting an objective picture of the complex pollution including the most complex, diffuse constituent it is recommended to apply compound models such as a software packet MIKE by DHI.

Diffusive sources of pollution, agricultural lands, sources of water contamination, non-irrigated, irrigated and drained lands, cultivated crops, productivity, effectiveness of water protection measures, coefficient of contamination, software block diagram, simulation calculations with usage of computer models, river basin, concentration of pollutants, root layer, unsaturated area, area of saturation.

References

1. **Mikhailov S. A.** Diffuznoye zagryaznenie vodnyh ecosystem. Metody otsenki I matematicheskie modeli: Analit. Obzor / CO RAN. GPNTB, In-t vodnyh i ekologicheskikh problem: Ser. Ecologiya; vyp. 56. – Barnaul: Denj, 2000. – 130 s.
2. **Vodogretsky V. E.** Antropogennoye izmeneniye stoka malyh rek: monographiya. – L.: Gidrometeoizdat, 1990. – 176 s.
3. **Borisova G. G.** Geoecologicheskkiye osnovy upravleniya diffuznym stokom s sel'skokozyaistvennyh vodosbrosov: dis. ... d-ra geogr. Nauk: 25.00.36. – Yekaterinburg, 2002. – 319 s.
4. **Manukjyan D. A., Zhabin V. F.** Gidrogeoecologicheskkiye problem v zadachah prirodoobustroystva: monographiya. – M.: MGUP, 2006. – 194 s.
5. Osobennosti gidrohimicheskogo rezhima vod gidrographicheskoy seti meliorirovannyh vodosbrosov / V. S. Brezgunov [and others.] // Melioratsiya pereuvlazhnennyh zemelj. – 1985. – Vyp. XXXIII. – S. 80–89
6. Metod otsenki kachestva vod I sostoyaniya vodnyh ecosystem v shemah KIOVR/ Shabanov V. V., Markin V. N. – M.: MGUP, 2007. – 81 s.
7. Metodicheskiye ukazaniya po razrabotke normativov kachestva vody vodnyh objektov rybohozyaistvennogo znacheniya, v tom chisel normativov predeljno dopustimyh centsentratsij vrednyh veshchestv v vodah vodnyh objektov rybohozyaistvennogo znacheniya (prikaz Federal'noye agentstvo po rybolovstvu ot 4 avgusta 2009 goda № 695). (Electronny resurs). – URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2069452/> (Data obrashcheniya 10.05.2016).
8. Metodicheskiye ukazaniya po razrabotke normativov dopustimogo vozdeystviya na vodnye objekty (prikaz MPR RF ot 12 dekabrya 2007 г. № 328) (Electronny resurs). – URL: <http://zakonbase.ru/content/base/115176> (Data obrashcheniya 10.05.2016).
9. Metodicheskiye ukazaniya po razrabotke normativov predeljno dopustimyh vrednyh vozdeystvij na poverhnostnye vodnye objekty (prikaz Minprirody RF № 328 ot 26 fevralya 1999 g.) (Electronny resurs). – URL: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/52/52467/index.htm> ((Data obrashcheniya 10.05.2016).
10. Metodika razrabotki normativov dopustimyh sbrosov veshchestv i mikroorganizmov v vodnye objekty dlya vodopoljzovatelej (prikaz MPR № 333 ot 17.12.2007) (Electronny resurs). – URL: <http://www.promecovod.ru/tseny?id=75> (Data obrashcheniya 10.05.2016).
11. **Shabanov V. V., Markin V. N.** Ecologo-vodohozyaistvennaya otsenka vodnyh objektov, monographiya. – M.: MGUP, 2009. – S. 154.
12. **Shabanov V. V., Vershinskaya M. E., Markin V. N.** Ecologo-vodohozyaistvennaya otsenka vodosbora i vodnyh objektov bassejna Irtysha // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-practicheskoy konferentsii «Rolj prirodoobustroystva sel'skikh territorij v obespechenii ustoichivogo razvitiya APK». – M.: MGUP, 2007. – S. 290–307.

Received on 29.04.2016.

Information about the authors

Ratkovich Lev Danilovich, candidate of technical sciences, professor, head of the chair «Complex use of water resources and hydraulics»; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d.19; e-mail: levkivr@mail.ru.

Markin Vyacheslav Nikolaevich, candidate of technical sciences, professor of the chair «Complex use of water resources and hydraulics»; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Timiryazev State Agrarian University»; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d.19; e-mail: mvnarkin@mail.ru.

Glazunova Irina Victorovna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Complex use of water resources and hydraulics»; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Timiryazev State

Agrarian University»; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d.19; e-mail: ivglazunova@mail.ru.

Sokolova Svetlana Anatoljevna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Complex use of

water resources and hydraulics»; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Timiryazev State Agrarian University»; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d.19; e-mail: sokolovasvetlana@mail.ru.

УДК 502/504:551.482.215

В. А. ФАРТУКОВ

Закрытое акционерное общество «Бюро сервиса и эксплуатации», г. Москва

М. В. ЗЕМЛЯНИКОВА

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

ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДНОГО ПОТОКА

Настоящая работа посвящена применению инновационных технологий для проведения гидродинамических исследований различных режимов течения воды в нижнем бьефе гидротехнических сооружений. Установлено, что в случае установившегося режима поступления расхода воды в нижний бьеф в области прыжка всегда будет иметь место неустановившийся колебательный режим течения, который образует волны с характерной амплитудой и длиной. Целью работы является изучение и расчет параметров неустановившегося колебательного режима течения в нижнем бьефе гидротехнических сооружений. Результаты решений ориентированы на определение параметров водного потока для последующего сравнения с расчетными величинами, полученными аналитическим методом. Представлена концепция проведения гидродинамических исследований нестационарного режима водного потока. Разработан алгоритм проведения исследований. Осуществлен подбор приборов, модулей, датчиков и их согласование для совместной работы при проведении измерений. Разработана программа сбора и обработки данных, поступающих от измерительного оборудования, осуществлена адаптация стандартного программного обеспечения для ввода в персональный компьютер. Применен инновационный способ определения колебания уровня водной поверхности и структуры водного потока.

Гидродинамические исследования, колебательный режим, инновационные технологии, нижний бьеф, параметры водного потока, измерительный комплекс, интеллектуальный анализ, экспериментальные исследования.

Введение. Наличие различных режимов водного потока исследуется с давних времен, однако, и в настоящее время этот вопрос остается актуальным. Актуальность вопроса обуславливается снижением стоимости производства работ при строительстве (ремонте, восстановлении) различных водопропускных сооружений, а также повышении их надежности. В публикациях ряда авторов, например [1, 2, 7], отмечалось наличие в открытых водных потоках колебаний скорости и расхода с характерными периодами $T = 1/5 \dots 1/30$ Гц [2]. Одновременно в этих работах [1, 2] приведен анализ уравнений одномерной гидравлической

идеализации, в результате которого доказано существование колебательного режима течения и приведено выражение для определения периода колебаний:

$$T = 2\pi C \sqrt{R} / g \sqrt{(I - i_0)},$$

где T – период колебаний, с.; C – коэффициент Шези, $m^{0.5}/c$; R – гидравлический радиус, м; I – уклон водной поверхности; i_0 – уклон дна.

Неустановившийся колебательный режим течения и уравнение сопряженных глубин имеют место только в случае увеличения периода временного сглаживания. Этот колебательный режим порожден трением на границе «жидкость – омываемая твердая поверхность». В зоне прыжка,