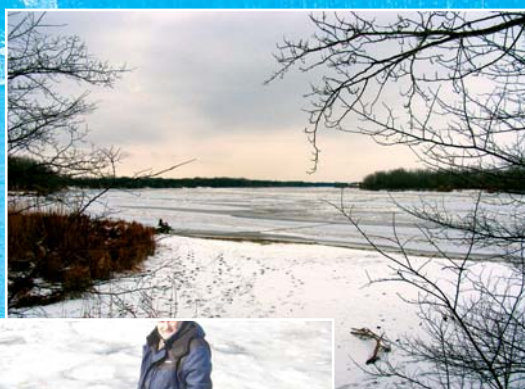


**УПРАВЛЕНИЕ
ВОДНЫМИ
РЕСУРСАМИ**



МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕР ПО ОХРАНЕ ВОД НА РЕЧНЫХ ВОДОСБОРАХ

© 2010 г. В.Г. Пряжинская

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

Ключевые слова: водный объект, водосборная территория, загрязнение водных объектов, точечный и диффузный источники загрязнения, мероприятия по охране вод, математические модели загрязнения водных объектов, меры адаптации сельского хозяйства.



В статье анализируются причины возникновения загрязнения водных объектов и мероприятия по его предупреждению или сокращению. Рассматриваются как сосредоточенные (точечные), так и диффузные (неточечные) источники загрязнения на водосборных территориях больших и малых рек. При этом площади водосборов крупных рек подразделяются на однородные водохозяйственные участки. Обсуждаются соответствующие математические модели и их приложения, а также меры адаптации сельскохозяйственного производства к изменениям климата.

Общие положения

Источниками загрязнения окружающей природной среды являются промышленные, хозяйственно-бытовые и сельскохозяйственные сточные воды, сбрасываемые в водные объекты (ВО). Проанализируем специфику источников загрязнения разных типов.

Точечные источники

В нашей стране одной из причин возникновения проблемы загрязнения ВО организованными стоками является несовершенство нормативно-правовой базы, прежде всего, в части экономического регулирования процессов стимулирования нормативной очистки сточных вод и низких платежей за загрязнение. Кроме того, явно недостаточна обеспеченность предприятий очистными сооружениями и низка эффектив-

ность очистки сточных вод. Так, только 10 % сточных вод РФ очищается до нормального уровня (в США — 63 км³, Японии — 35, Бразилии — 34). При этом средний платеж за сбросы загрязняющих веществ (ЗВ) составляет 0,23 руб. за м³, а себестоимость очистки с учетом инвестированного капитала — 4—6 руб. за м³. Общий объем требующих очистки сточных вод составляет 19,2 км³, до нормативов очищается только 11 % (2,05 км³), 3,4 км³ отводится в ВО вообще без очистки [1].

Неточечные источники

Загрязнение ВО диффузными (неконтролируемыми) стоками с промышленных площадок, сельскохозяйственных полей и огородов, а также поселений, равно как и антропогенная деятельность, приводящая к загрязнению берегов (захламление прибрежных территорий водоемов отходами, формирование свалок), также обусловлено рядом причин, проистекающих из несовершенства водного законодательства страны. Это:

— отсутствие или низкая эффективность существующих экономических механизмов, обеспечивающих проведение мероприятий по снижению объемов неорганизованных стоков;

— отсутствие или неадекватность уровню развития экономики современной нормативно-правовой базы в части борьбы с неконтролируемыми поступлениями загрязняющих веществ (ЗВ) в водные объекты;

— неэффективность механизма защиты водоохраных зон и прибрежных защитных полос.

Так, по экспертным оценкам неорганизованный сброс в ВО составляет до 70 % от общего. В результате ухудшается состояние водных объектов и экологическая ситуация, происходит обмеление водоемов и деградация гидрографической сети (особенно русел малых рек). Смывы с водосборных территорий особенно интенсивны в период весеннего половодья, на который зачастую приходится более половины годового стока. Часто на половодье накладываются дождевые паводки, образуя волны смешанного происхождения, которые отличаются большой высотой и интенсивностью подъема и спада. Главным регулятором смыва ЗВ и их переноса на частицах почвы либо в растворенном виде является почвенно-лесной покров водосборных территорий. Естественный или специально высаженный лес позволяет не только сгладить колебания притока воды, но и увеличить суммарный годовой сток и перераспределить бесполезный для многих видов практической деятельности весенний сток в пользу летнего сезона. Снижение мощности талых и дождевых потоков уменьшает эрозию почв, сокращает вынос взвешенных веществ и растворенных почвенных солей.

Поверхностный смыв ЗВ от диффузных источников сложно идентифицировать и контролировать в силу нестационарности расходов и неоднородности состава сточных вод. Положение усугубляется тем, что диффузные потоки трудно и обезвреживать. Поэтому особое значение приобретают практические меры предупреждения поступления ЗВ в водные объекты и эффективное экологически ориентированное управление водными и земельными ресурсами. Объемы неочищенных сточных вод можно сократить либо предупредить их образование за счет внедрения так называемой наилучшей практики управления (НПУ), включающей комплекс экономически и технически достижимых мероприятий, которые обеспечили бы приемлемое состояние качества вод принимающих водных объектов.

Косвенно наилучшая практика управления реализуется в сфере производства продукции, отрицательно влияющей на окружающую среду. Так, для разных видов транспортных средств это может быть налог на использование недоброкачественного топлива, запрет на производство автомобилей без приспособлений для очистки выхлопных газов и т. п. В области сельского хозяйства — это сокращение производства или запрет на использование токсичных веществ в составе минеральных удобрений или пестицидов.

Выбору прогрессивных технологий производства и мероприятий НПУ предшествует выявление ключевой проблемы качества воды (например, преобладающее загрязнение нефтепродуктами или ежегодное летнее «цветение» воды водохранилищ) и идентификация источников поступающих в водный объект ЗВ. Защитные мероприятия должны обеспечить решение таких проблем, как минимизация известного или предполагаемого вида загрязнения из отдельного источника (например, азотом, фосфором, взвешенными веществами или бактериями), а также совершенствование землепользования и предотвращение загрязнения водных объектов.

Для таких компонентов, как взвешенные вещества и мутность воды, в состав мероприятий включаются сооружения, перехватывающие водные потоки и наносы. Это покрытие почвы дерном или засев травой стоковых поверхностей, защитное оконтуривание животноводческих комплексов, правильная эксплуатация пастбищ. Если ЗВ — такие биогенные элементы, как азот или фосфор, при избытке которых происходит интенсивное зарастание водохранилищ, а также снижается содержание в воде растворенного кислорода, то методы управления достаточно разнообразны. Прежде всего, это минимизация источников ЗВ за счет складирования и компостирования отходов, организация террас, ротация культур и пр. Содержание биогенных веществ в растворенной фор-

ме может быть понижено при организации повторного использования возвратных оросительных и дождевых вод, создании защитных буферных зон, а также емкостей для компостов.

Для защиты от бактерий или вирусов эффективно использование искусственных микробиологических фильтров, организация замкнутых циклов водопользования, а также дозированное применение навоза в качестве удобрений и для подкормки растений. Основные меры защиты от металлов — эффективное сокращение почвенных и других источников ЗВ за счет организации процессов фильтрации, а также создание систем повторного использования воды, сведение к минимуму применения металлосодержащих материалов, четкое дозирование пестицидов.

Мероприятия на сельскохозяйственных угодьях komponуются по принципу их параллельного, независимого друг от друга увеличения. При этом часть мер действует только в один какой-либо эрозионно-опасный период (различные виды вспашки, нарезка борозд, регулирование снеготаяния и др.). Эти мероприятия характеризуются лишь эксплуатационными затратами и не требуют капитальных вложений. Долгосрочные лесомелиоративные мероприятия — капиталоемкие, т. к. функционируют несколько лет и требуют для их реализации как капитальных, так и ежегодных эксплуатационных затрат.

Методы оценки источников загрязнения

Количественный анализ стационарных сбросов ЗВ от точечных источников несложен. Источники фиксированы на местности, их нагрузка оценивается по используемым технологиям производства, непосредственным замерам и т. д. Схематизация речной сети представляется обычно древовидной структурой, составленной из ствола и притоков. Сбросы сточных вод накладываются на это дерево как точечная информация.

Оценка неточечных источников и их воздействий включает больше этапов и каждый из них существенно сложнее [2]. Представленные в табл. 1 методы оценки точечных и распределенных источников загрязнения водных объектов с использованием математических моделей достаточно специфичны.

Существующие модели оценки неточечных источников загрязнения можно классифицировать по ряду значимых признаков. Базовым принципом построения моделей является первичность гидрологической модели формирования стока и дополнение ее подмоделями эрозионного выноса и гидрохимическими. Тип математической модели неточечных загрязнений и возможности ее практического применения определяются

Таблица 1. Специфика оценки загрязнения водных объектов точечными и распределенными источниками

<i>Виды оценок</i>	<i>Точечные источники</i>	<i>Неточечные источники</i>
Схематизация задачи	Одномерный поток (граф-дерево) с источниками	Двумерная схема водосбора
Характеристики поступления ЗВ	Установившийся режим; фиксированные сбросы; легко оценивается	Неустановившийся режим; перенос водными или эрозионными потоками; трудно оценивается
Водный объект, условия расчета	Спокойное течение; малая зависимость от гидрологических параметров	Динамические и стохастические процессы; высокая зависимость от гидрологических параметров
Оценка воздействия (моделирование)	Детерминированные модели качества воды	Объединенный расчет площадной нагрузки и поступления ЗВ в водные объекты
Приближенные методы	Обычно не требуются	Оценка временных масштабов и распределения источников; установившееся состояние или пиковая нагрузка
Калибровка и оценка параметров	Литературные данные (временные ряды)	Полевые измерения (не всегда адекватны для сложных моделей)

тем, в какой мере учитывается изменчивость таких элементов, как местоположение источника, рельеф местности, климат, характер землепользования и растительность. Важны также характеристики трансформации и кинетики переноса учитываемых элементов. Агрегированные математические модели оценки нагрузки от неточечных источников сельскохозяйственного происхождения ориентированы на практическое использование в проектных расчетах. Эти модели хорошо согласуются с ГИС, программное обеспечение которых позволяет не только обрабатывать цифровую информацию, но и представлять на картах результаты расчетов.

Оценочные расчеты по удельным выносам ЗВ с единицы площади в единицу времени для каждого типового землепользования (например, в кг/га·год) дают приближенную характеристику масштабов площадного загрязнения водосборных территорий. Удельные выносы характеризуют формирование загрязнений и определяются в процессе полевых наблюдений на типовых стоковых площадках. Несмотря на малую точность, оценочные расчеты широко применяются при планировании, прежде всего, из-за доступности необходимой информации и возможности идентифицировать на общем фоне наиболее загрязненные территории.

Важные отличительные признаки разных моделей диффузного загрязнения зависят от масштабности рассматриваемого объекта или территории и пространственной однородности поверхности, почвенного и растительного покрова. Водосборная территория подразделяется на серию однородных участков (камер) по типам почв, растительности и видам хозяйственного использования. Естественно, что размер водосборной территории влияет и на величину модуля химического стока и время достижения загрязняющим веществом замыкающего створа участка реки, а также и на величину суммарной нагрузки.

Простейшие математические модели для расчета выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий — это балансовые уравнения массопереноса воды и примесей. Наиболее разработаны модели, описывающие трансформацию и вынос азота. Аналитические уравнения используются для оценки процессов минерализации и выщелачивания поверхностного стока и движения азота в почве. Одно из упрощенных математических описаний выноса нитратов (f), вымываемых за пределы корнеобитаемого слоя почвы имеет вид [3]:

$$f = \left(\frac{P}{P + 10\Theta_m} \right)^{h/10},$$

где h — мощность корнеобитаемого слоя;

Θ_m — наименьшая полевая влагоемкость почвы;

P — количество воды, фильтрующейся сквозь почвенный слой.

При более детальных расчетах требуются данные об осадках, испарении, количестве вносимого в почву азота, порозности почвы, трансформации азота в почве и водной среде. Вынос фосфора, также как и азота, формируется под влиянием стока и агрономического фона. Объем выноса биогенного вещества с единицы площади может быть оценен из соотношений:

$$P_{ijt}^r = 0,1 \cdot C_i^r Q_{ijt}, \quad Q_{ijt} = \frac{(R_t \pm 0,2S_{ijt})^2}{R_t + 0,8S_{ijt}},$$

где P_{ijt}^r — количество r -го ЗВ с посева культуры j на почве i в течение периода времени t ;

C_i^r — концентрация ЗВ вида r в стоке Q_{ijt} ;

R_t — поступление влаги на поверхность почвы за счет естественных осадков и орошения;

S_{ijt} — параметр задержания вещества, который зависит от гидрологических и почвенных условий, способа обработки почвы, а также количества выпавших осадков.

Водосбор малой реки

Рассмотрим достаточно типичный вариант сельскохозяйственного землепользования на речном водосборе малой реки либо на отдельном участке крупной. Основные ЗВ — удобрения и пестициды, а основные факторы, влияющие на вынос химических веществ, — это величины их содержания в пахотном слое почвы, ее водно-физические и агрохимические свойства и такие гидрологические параметры, как осадки, величины поверхностного стока воды и стока наносов (объемы смыва почв). В простейшем виде объемы выноса ЗВ поверхностным стоком в растворенном виде и на частицах почвы характеризуются соотношениями:

$$P_{\text{в}} = AQ, P_{\text{т}} = BM. \quad (1)$$

Здесь $P_{\text{в}}$ и $P_{\text{т}}$ — вынос ЗВ за расчетный интервал времени в растворенном виде и в твердой фазе; A и B — коэффициенты, зависящие от условий применения препаратов, площадей обработки, свойств почв и т. п.; Q — слой поверхностного, M — модуль твердого стока за расчетный интервал времени.

В силу зависимости (1), вынос ЗВ будет снижаться при уменьшении объемов поверхностного водного и твердого стоков за счет их полного или частичного задержания, перевода поверхностного стока в почвенный, распыления и уменьшения потоков воды. Эти процессы сокращают или исключают эрозию почв.

Эффект противозерозионных мероприятий учитывается введением поправочных коэффициентов r и ρ , характеризующих снижение величин стока воды и твердого стока в результате действия реализованных мероприятий. При этом уравнения (1) принимают вид:

$$P_{\text{в}} = A(rQ), P_{\text{т}} = B(\rho M). \quad (2)$$

В основе защиты водных объектов от загрязнения стоком с сельскохозяйственных угодий лежит комплексное применение мер, обеспечивающее максимальное зарегулирование поверхностного стока непосредственно на водосборной площади. Влияние проводимых мероприятий на изменение стока с этой площади может быть представлено как последовательное воздействие каждого из них с учетом коэффициентов эффективности мероприятий (r). В этом случае можно считать, что после проведения мероприятия 1 сток будет равен величине $Q_1 = r_1Q$; после мероприятия 2: $Q_2 = r_2Q$; после мероприятия 3: $Q_3 = r_3Q$; откуда суммарная величина стока определится как $Q^* = r_1r_2r_3Q$ или $Q^* = r_kQ$, где

$$r_k = \prod_j r_j, \quad k = \overline{1, L}, \quad (3)$$

здесь r_k — коэффициенты снижения величины поверхностного стока при осуществлении всего комплекса из L мероприятий; Π — символ произведения.

При воздействии на разные участки водосбора нескольких мероприятий, расположенных вдоль водотока, суммарное их влияние на величину стока выражается зависимостью

$$r_k = \sum_j r_j S_j / S, \quad S = \sum_j S_j, \quad (4)$$

где S — площадь всего водосбора;

S_j/S — доля площади, защищаемая j -м мероприятием.

Применяются осредненные показатели антропогенного воздействия и природных данных. Одним из таких показателей служит средневзвешенная по площади водосбора величина поверхностного стока Q^* . С учетом комплекса мероприятий она выражается зависимостью $Q^* = [(S - S_j)Q + S_j r_j Q] / S = Q[1 - (1 - r_j)S_j]$, а совместное действие комплекса мероприятий определяется аналогично (3) зависимостью вида:

$$r_k = \prod_j [1 \pm r_j] S_j. \quad (5)$$

Коэффициент снижения твердого стока ρ_k^* в результате применения комплекса мероприятий может быть вычислен аналогично (5) в виде:

$$\rho_k^* = \prod_j [1 \pm (1 \pm \rho_j) S_j]. \quad (6)$$

Эффективность противоэрозионных мероприятий целесообразно оценивать отдельно для каждого расчетного интервала, учитывая продолжительность защитного действия. Интенсивные полевые и методологические исследования процессов выноса ЗВ, разработка мер по их снижению и оценка водоохранной эффективности усиленно проводились в нашей стране в 1970—1980 гг., особенно в ее южных и центральных районах [4]. Эти результаты приведены частично в табл. 2 (коэффициенты эффективности отдельных противоэрозионных мероприятий), а показатели воздействия мероприятий, сгруппированные по сезонам года, — табл. 3 (установленные для лесостепной зоны Украины). Приведенные данные позволяют построить оптимизационные алгоритмы планирования мер по охране вод.

Таблица 2. Показатели эффективности отдельных противоэрозионных мероприятий

Мероприятия	Коэффициент снижения величины поверхностного стока, r_j	Коэффициент снижения твердого стока, ρ_j
1. Почвозащитные севообороты	0,50	0,10
2. Пахота поперек склона	0,40	0,50
3. Залужение сильно эродированных земель	0,60	0,05
4. Полезащитные и водорегулирующие полосы	0,70	0,25
5. Прирусловые лесные насаждения	0,60	0,10

Примечание: мероприятия вида 1 действуют круглогодично и в течение ротации культур; вида 2—3 — после их осуществления; а меры 4—5 проявляют защитные функции через 3—7 лет после их реализации; при этом два последних вида мероприятий требуют как капитальных, так и ежегодных эксплуатационных затрат, в то время как меры 1—3 — лишь эксплуатационного обслуживания.

Таблица 3. Сезонная эффективность комплекса противоэрозионных мероприятий

Сезон	Коэффициент снижения величины поверхностного стока, r_j	Снижение выноса ЗВ поверхностным стоком, $P_B^*/P_B = R_B$	Коэффициент снижения твердого стока, ρ_j	Снижение выноса ЗВ твердым стоком, $P_T^*/P_T = R_T$
Весна	0,66	0,65	0,65	0,64
Лето	0,88	0,84	0,84	0,82
Осень	0,91	0,88	0,88	0,87

Примечание: здесь P_B и P_T , а также P_B^* и P_T^* обозначают величины выносов ЗВ до и после проведения мероприятий по охране качества природных вод, соответственно.

Крупные реки (региональный подход)

Объединение агрегированных моделей выноса ЗВ с уравнениями баланса их масс позволяет оценить масштабы загрязнения на больших сельскохозяйственных водосборах. Физически очевидное уравнение баланса масс вещества для заданного временного шага (10 дней, месяц) объединяет приходную и расходную части, а разность между ними — запас веществ в почве к концу данного или к началу следующего расчетного периода. Естественно, что уравнения баланса масс ЗВ имеют разную степень детальности в зависимости от решаемой задачи.

Таблица 4. Параметры сооружений и мероприятий по охране вод

<i>Мероприятие, сооружение</i>	<i>Интенсивность действия</i>	<i>Объем действия мероприятия</i>	<i>Удельные показатели стоимости</i>
Сооружение для очистки сточных вод	Глубина очистки ЗВ	Объем пропуска сточных вод в единицу времени	Емкость сооружения
Водоохранные лесополосы	Процент поглощения ЗВ	Ширина и протяженность	Площадь
Очистка танков судов от остатков нефтепродуктов	Доля объема выкачиваемых остатков топлива	Объем остатков от суммарного тоннажа судов	Водоизмещение судов
Накопитель животноводческой фермы	Глубина переработки	Объем переработанных стоков	Поголовье скота разного вида
Организация селитебного стока	Комплексность сооружений	Процент обустройства территории	Площадь обустройства
Снижение загрязнений от лесосплава	Комплексность мер	Процент от объема сплавляемой древесины	Объем
Организация дренажного стока	Понижение уровня грунтовых вод	Дренированная площадь	Площадь
Расчистка акватории водного объекта	Степень расчистки	Площадь акватории	Площадь

В табл. 4 приведены характеристики параметров сооружений и мероприятий по охране вод от точечных и диффузных источников ЗВ.

Соответствующие математические модели ориентированы на обоснование мероприятий по предупреждению либо противодействию как процессам выноса ЗВ водными потоками, так и их транспортировке в составе смытой почвы или в растворенной форме [3]. Модели включают объемы «производства» ЗВ диффузными источниками и показатели водоохранной эффективности соответствующих мероприятий по защите водных объектов от загрязнения диффузным стоком.

Принципы управления диффузными источниками загрязнения

Установившийся стационарный характер землепользования со сложившимся типом растительного покрова приводит к отрицательным воздействиям на качество природных вод. Исправить ситуацию позволяют создание и реставрация защитных буферных зон, изменение типа растительного покрова, ослабление эрозионных процессов, а также сохра-

нение зон формирования речного стока, сокращение и надлежащее оборудование площадок содержания животных.

К наиболее актуальным методам математического моделирования в сфере принятия стратегических водохозяйственных решений относится их использование для анализа альтернативных сценариев водопользования на отдаленную перспективу. Методической основой при этом могут служить системы поддержки принятия решений (СППР) в условиях высокой неопределенности будущих изменений.

Если мероприятие подбирается для предупреждения загрязнения водного объекта, то предпочтителен подход, базирующийся на улучшении или смене технологического процесса. В сельскохозяйственном производстве это достигается через классификацию угодий по категориям использования: богарные, орошаемые и прочие. Обращаясь к использованию соответствующего математического аппарата, можно выделить несколько функциональных расчетных модулей:

— оценка антропогенной нагрузки от точечных и диффузных источников загрязнения с использованием, как правило, агрегированных характеристик процессов формирования ЗВ;

— оценка качества воды в выделенных створах реки с использованием данных о речном стоке, скоростях течения в реках и водохранилищах, коэффициентах трансформации ЗВ и самоочищения водных объектов, об объемах поступления сточных вод и загрязняющих веществ в их составе;

— обоснование мероприятий по охране вод на водосборной площади методом экспертных оценок либо с применением математических моделей.

Приведем одну из моделей (задача I) оптимизации производственной структуры сельскохозяйственного производства, включающую оценку способов управления диффузными источниками. Для краткости модель представлена в векторной форме, в ней минимизируются приведенные затраты на выпуск заданной номенклатуры продукции и на реализацию водоохранных мероприятий [5].

Задача I

Найти:

$$\min[C_X X + C_Y Y + C_Q Q + C_Z Z + \Delta B_3 P]$$

при ограничениях:

$$A_1^1 X + A_1^2 Y \begin{cases} \leq \\ \geq \end{cases} B_1, \quad A_2^1 Y + A_2^2 Q \leq B_2, \quad A_3^1 X + A_3^2 Z \leq B_3,$$

$$X, Y, Q, Z \geq 0; \quad \Delta B_3 = \max(0; \Delta B_3 - \overline{B_3}), \quad B_3 + \Delta B_3 \leq \overline{B_3}.$$

Здесь искомые переменные задачи:

X — варианты землепользования (площади возделывания различных культур);

Y — площади богарных и орошаемых земель (существующего и вновь вводимого орошения);

$Q = (Q_1, Q_2, Q_3)$ — объемы используемых водных ресурсов (поверхностный сток) в разные сезоны года (весна, лето, осень);

Z — нормативы внесения под культуры и выноса удобрений и пестицидов с поверхностным стоком, а также в процессе эрозии почв.

Вектор ограничений B_1 включает показатели потребностей в производстве продукции, а также ресурсы земли, труда, удобрений и пр.; вектор B_2 — ограничения по водным ресурсам в разные сезоны года; вектор B_3 — ограничения по выносам биогенных элементов и пестицидов; B_3 — заданный допустимый объем выноса; ΔB_3 — вектор превышения допустимых объемов выносов; матрицы $A_1^1, A_1^2, A_2^1, A_2^2, A_3^1, A_3^2$ — технико-экономические нормативы: урожайность товарных культур, трудовые затраты, нормы внесения удобрений и пестицидов, а также показатели их выноса с излишками поливной воды, осадками и частицами почвы при использовании различных мер по охране вод, оросительные нормы и агротехнические коэффициенты.

Уравнения выражают балансовые соотношения по использованию воды, земли, удобрений и т. д., включая показатели эффективности водоохранных мероприятий, представленные в табл. 2 и 3, а вектор $C = \{C_x, C_y, C_Q, C_Z, P\}$ — коэффициенты функции цели, которая в данном случае характеризует удельные затраты: C_x — сельскохозяйственные издержки, C_y — на реконструкцию или подготовку новых площадей орошения, C_Q — на различные водохозяйственные мероприятия, C_Z — на приобретение удобрений и пестицидов, а также на реализацию описанных ранее мероприятий по охране вод с учетом их специфики, P — вектор штрафных платежей за превышение заданных пределов выноса удобрений и пестицидов.

Для районов неустойчивого увлажнения в условиях изменений климата могут усилиться эрозионные процессы и антропогенные воздействия на водные объекты. В таких условиях более совершенным аппаратом планирования ирригационного водопользования являются стохастические модели, в том числе дискретные стохастические модели линейного программирования. Последние ориентированы на рассмотрение нескольких исходов водности или естественного увлажнения, которые в совокупности кусочно-линейно аппроксимируют соответствующий вероятностный процесс. Это могут быть обеспеченности водными ресурсами и/или характеристики засушливости климата с соответствующими

щими нормативами урожайностей каждой культуры и оросительных норм. Соответствующая модель (задача II) формулируется в следующем виде.

Задача II

$$E(C^l Z^l) \rightarrow \min(\max),$$

$$A^l Z^l \leq B^l, l = \overline{1, L}, Z_0^l = \text{const}, Z^l, Z_0^l \geq 0, Z^l = \{X^l, Y^l, Q^l\}, l = \overline{1, L},$$

здесь E — символ математического ожидания, $E = \sum_l p^l C^l Z^l$, l — индекс исхода естественного увлажнения (засушливости) или водности, $\sum_l p^l = 1$, Z_0^l — подмножество вектора-решения, характеризующее постоянство структуры посевов различных сельскохозяйственных культур, независимо от исхода естественного увлажнения; матрицы A^l и векторы B^l, C^l, X^l, Y^l, Q^l имеют смысл, описанный в постановке задачи I.

Программа адаптации землепользования и аграрного сектора к климатическим изменениям должна включать такие мероприятия, как борьба с эрозией, почвозащитная обработка почвы, агролесомелиорация. Необходимо также создать соответствующую систему рыночных регуляторов: льготы, кредиты, налоги и пр. для изменения приоритетов в распределении разного рода ресурсов и инвестиций в сельское хозяйство.

Для стимулирования сельского хозяйства в районах с потенциальным улучшением условий хозяйственной деятельности необходимо привлечь соответствующие экономические механизмы для стабилизации или увеличения/сокращения, в частности, площадей возделывания. Мероприятия в социальной сфере включают переселение сельских жителей из аридных районов в места, благоприятные для ведения сельского хозяйства, строительство дорог в сельской местности и т. п.

Комплекс адаптационных мер для сельского хозяйства южных аграрных регионов страны в новых климатических условиях включает следующие мероприятия:

- экономия водных ресурсов на основе прогрессивных технологий;
- меры по борьбе с засухой;
- борьба с эрозией почв;
- оптимальные севообороты;
- селекция новых засухоустойчивых сортов сельскохозяйственных культур.

Примеры расчетов

Бассейн р. Волга

Важным подготовительным этапом реализации представленной модели для крупных речных бассейнов является оценка антропогенных нагрузок на водосборной территории. Так, для Волжского бассейна влияние на качество вод формируется за счет 38 расположенных там субъектов РФ, из которых 13 размещены на территории бассейна полностью, а остальные — частично. В результате высокой интенсивности антропогенного воздействия на природную среду и, в частности, на водные объекты бассейн в целом характеризуется сложной экологической ситуацией.

Самыми обширными по площади преобразованными ландшафтами являются пашни. Когда пахотные земли занимают более 40 %, возникают сдвиги в экологическом балансе крупных территорий, активизируются экзогенные процессы, в первую очередь, линейной и плоскостной эрозии. Линейная эрозия превращает сельскохозяйственные угодья в бросовые земли. При этом возрастает и ограниченность водных ресурсов, пригодных к использованию. В условиях рыночной экономики и частной собственности на землю возможно дальнейшее обострение в этих районах экологических проблем, поскольку они наиболее предпочтительны для индивидуального крестьянского хозяйства. Использование даже неудобных земель обеспечивает в первые годы высокую эффективность сельскохозяйственного производства. Неблагоприятное развитие экологической ситуации и дальнейшее нарушение ландшафтного равновесия может возникнуть при скачкообразном росте пахотных угодий, когда происходят необратимые сдвиги в состоянии природной среды и появляются новые негативные явления, несвойственные данным районам в первоначальном естественном состоянии.

Выполнена комплексная региональная оценка техногенных нагрузок на водные ресурсы Волжского бассейна с использованием укрупненных нормативов форм 2ТП-водхоз и др. Площадь промышленно-урбанизированных территорий, являющихся существенным источником загрязнения поверхностного стока, определена по данным статистической отчетности. Поскольку большинство промышленных и транспортных предприятий расположено на землях городов и часто учитывается в их составе, объем стока с единицы водосборной площади рассчитан на основе среднего значения доли водонепроницаемых поверхностей по совокупности этих земель. Масштабы эрозионных процессов оценены с использованием карт подверженных эрозии земель. Объем химически загрязненного поверхностного стока с площадей сплошных рубок оценивается аналогично промышленно-урбанизированным и сельскохозяйственным территориям с учетом доли

нарушенных земель, являющихся источником загрязнения стока. По данным форм статистической отчетности на долю Волжского бассейна приходится около 35 % забора свежей воды и 42 % сброса сточных вод через организованные выпуски в целом по России. При этом загрязненность сбрасываемых сточных вод примерно в 1,5 раза меньше, чем в целом по РФ, однако удельная плотность нагрузок почти в 4 раза выше средней по стране.

Интенсивность загрязнения водных объектов определяется, с одной стороны, общими объемами функционирующего на водосборной территории производства, а с другой — его отраслевой структурой и преобладанием экологически опасных производств. Максимальная приведенная масса ЗВ, сбрасываемых со сточными водами в водные объекты Волжского бассейна (более 1000 тыс. усл. т), характерна для Пермской области, что обусловлено не столько большими объемами производства, сколько исключительно высокой загрязненностью стоков (2416 усл. т/млн м³) со значительным разнообразием в них загрязняющих веществ I—II классов санитарной опасности. Московский регион занимает второе место в Волжском бассейне по суммарной приведенной массе загрязняющих веществ, сбрасываемых в водные объекты через организованные выпуски. Высокой загрязненностью стоков (более 600 усл. т/млн м³) характеризуются также Кировская, Пензенская, Ульяновская области, Республики Татарстан и, особенно, Удмуртия.

В условиях рыночных отношений в сфере землепользования урбанизированные территории становятся приоритетными для интенсивной эксплуатации, что ведет к расширению площадей-источников рассеянного загрязнения водных объектов. В силу хорошей обеспеченности инженерными коммуникациями и в большинстве своем выгодного географического положения эти земли обладают повышенной коммерческой ценностью для несельскохозяйственного использования (особенно в Московской области). Это определяет необходимость специального государственного регулирования и комплексного лицензирования всех видов деятельности, прямо или косвенно связанных с использованием природных объектов, окультуриванием нарушенных земель и развития систем ливневой канализации, оснащенных очистными сооружениями.

Ставропольский край

В качестве примера задачи II приведем результаты оценки воздействий изменений климата на развитие орошаемого земледелия Ставропольского края [3]. В начале XXI в. в структуре краевого водохозяйственного комплекса на нужды орошаемого земледелия была израсходована четверть потребляемых водных ресурсов (против 60 % на Северном Кавказе в целом).

Северный Кавказ относится к районам с низкой обеспеченностью водными ресурсами и высокой концентрацией водопотребления. Запасы речных вод в регионе распределены крайне неравномерно и используются недостаточно эффективно. Так, в 2001 г. общее водопотребление в бассейне р. Кубань составило 41,4 км³, а в Ставропольском крае — 31,7 км³. Основные потребители воды в бассейне: сельское хозяйство — 57 % общего объема и промышленность — 32,7 %. При этом до 40 % поливной воды теряется из-за низкого КПД оросительных систем и медленного внедрения прогрессивных методов полива. Поэтому совершенствование водопользования в земледелии является важнейшим резервом экономии водных ресурсов.

Регион занимает территорию переходной зоны от устойчивого высокопродуктивного богарного земледелия при достаточном естественном увлажнении к зоне отгонно-пастбищного скотоводства, где развитие земледелия из-за недостатка увлажнения невозможно без орошения. Поэтому и наиболее значительных изменений объемов водопотребления можно ожидать в тех районах орошаемой зоны, где условия естественного увлажнения позволяют достаточно эффективно развивать как орошаемое, так и богарное земледелие. В таких районах вариации среднегодовых значений осадков и испаряемости в ту или другую сторону могут привести не только к изменению значений оросительных норм и режимов орошения, но и вызывать необходимость освоения новых крупных орошаемых массивов или, наоборот, сокращения поливных площадей. Так как в настоящее время освоено немного более 10 % пригодных для орошения земель, то существует значительный потенциал его развития.

Такое положение региона определяет возможность значительных изменений производственной структуры сельского хозяйства в новых климатических условиях, в частности, может возникнуть необходимость расширения орошаемых площадей при увеличении засушливости. При этом именно водные, а не земельные ресурсы являются фактором, лимитирующим развитие там орошения.

В результате многовариантных расчетов установлено, что при усугублении дефицита водных ресурсов и повышении засушливости климата (реализация сценария, неблагоприятного для сельского хозяйства) окажется невозможным увеличение орошаемых площадей (имеются в виду традиционные способы орошения). Это, в свою очередь, повлечет сокращение производства продукции. Кроме того, самым серьезным образом могут измениться (в сторону ухудшения) экономические показатели.

Полученные результаты иллюстрируют прикладную значимость анализируемых математических моделей, которые позволяют выявить возможные тенденции развития сельскохозяйственного производства и,

в частности, орошаемого земледелия в условиях изменений климата. При наличии надежной исходной информации реально достаточно детальная количественная оценка приспособленности водохозяйственных и сельскохозяйственных структур к изменившимся климатическим условиям.

Кризисные ситуации с водой объясняются ростом спроса на нее, который может быть снижен за счет различных технических (наилучшие доступные технологии и наилучшая практика управления), социальных (бесплатное предоставление водных услуг необеспеченным слоям населения) и экономических (платежи и штрафы) инструментов. Из зарубежного опыта управления водным хозяйством следует, что оно эффективно при наличии открытых социальных структур, обеспечивающих широкое участие гражданского общества, частных предприятий и средств массовой информации, когда все они действуют объединенными усилиями с целью поддержки правительственных решений и оказания на него влияния для защиты интересов общества.

Мероприятия по сокращению объемов неорганизованного сброса включают разработку системы нормирования стоков с сельскохозяйственных полей в привязке к плате за загрязнение или водопользование; строительство очистных сооружений ливневого канализационного хозяйства; мероприятия по снижению ущерба от загрязнения береговых линий отходами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Думнов А.Д. Международные сравнения водопользования в РФ и ряде стран мира // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». 2008. № 5. С. 15—28.
2. Пряжинская В.Г., Левит-Гуревич Л.К. Концепция планирования водоохранной деятельности // Обоснование стратегий управления водными ресурсами. М.: Научный мир, 2006. С. 206—216.
3. Пряжинская В.Г., Ярошевский Д.М., Левит-Гуревич Л.К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 496 с.
4. Бондаренко Л.М., Цыгуткин С.Г., Капчерина Н.Б. Оценка водоохранной эффективности противоэрозионных мероприятий при защите малых рек от загрязнений стоком с сельскохозяйственных угодий // «Охрана вод речных бассейнов». Харьков: ВНИИВО, 1987. С. 60—65.
5. Пряжинская В.Г. Защита речных вод от сельскохозяйственных загрязнений // Обоснование стратегий управления водными ресурсами. М.: Научный мир, 2006. С. 217—224.

Сведения об авторе:

Пряжинская Валентина Гавриловна, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник Института водных проблем РАН, 1356011@mail.ru.