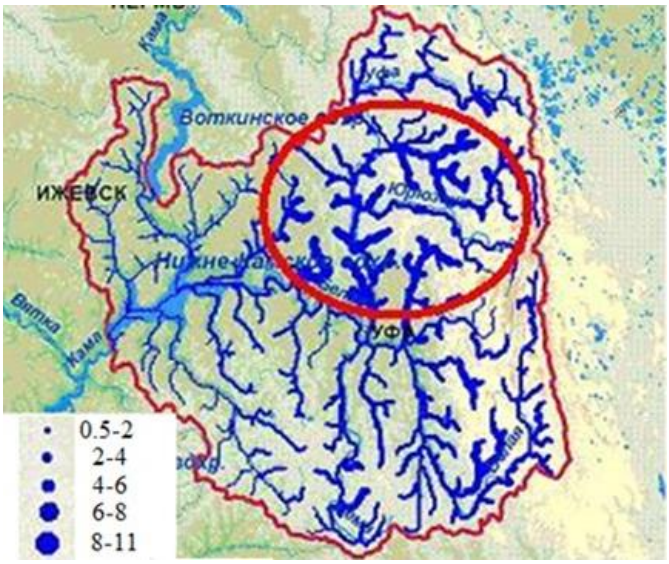
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОХИМИИ



Москва
2020

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных проблем Российской академии наук
Кафедра водных ресурсов

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОХИМИИ

Учебное пособие

Пособие подготовлено в соответствии с Планом выполнения работ по гранту РНФ № 17-77-30006 «Новое поколение моделей, методов и технологий для противодействия современным угрозам водной безопасности»

Москва 2020

УДК 556
ББК

Фащевская Т.Б., Полянин В.О., Кирпичникова Н.В., Мотовилов Ю.Г., Алгушаева А.В. Современные проблемы гидрохимии. Учебное пособие. - Москва, 2020. – 105 с.

Рассмотрены вопросы разделов «Диффузное загрязнение водных объектов» и «Гидролого-гидрохимические модели формирования качества воды водных объектов» дисциплины «Современные проблемы гидрохимии», изучаемой аспирантами ИВП РАН.

Приводятся основные сведения о формировании диффузного загрязнения водных объектов. Рассмотрены основные типы диффузных источников, факторы и механизмы формирования диффузного стока. Выполнено сравнение точечных и диффузных источников загрязнения. Идентифицированы основные загрязняющие вещества «диффузного поступления». Рассмотрены возможности использования действующей системы мониторинга поверхностных вод суши для наблюдений за диффузными источниками. Приведены основные принципы и схемы мониторинга диффузного загрязнения.

Рассмотрены структура моделей и процессы формирования на водосборе качества воды. Описаны наиболее известные и широко используемые математические модели диффузного загрязнения, разработанные зарубежными и отечественными авторами, для сельскохозяйственных и урбанизированных территорий, а также для водосборов, включающих территории разных типов.

Пособие подготовлено в соответствии с Планом выполнения работ по гранту РНФ № 17-77-30006 «Новое поколение моделей, методов и технологий для противодействия современным угрозам водной безопасности» (Блок образовательных программ).

Табл. 2. Ил. 23. Библиогр. 156 назв.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных проблем Российской академии наук, 2020
© Коллектив авторов, 2020

Оглавление

I. ИСТОЧНИКИ И ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФУЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ 5
1.1 Основные понятия и определения 5
1.2 Идентификация диффузного загрязнения водного объекта 7
1.3 Типизация источников загрязнения водных объектов 9
1.4 Особенности формирования диффузного загрязнения водных объектов 15
1.5 Основные загрязняющие вещества «диффузного поступления» и их влияние на экологическое состояние водных объектов 19
1.6 Факторы и механизмы влияния отдельных видов хозяйственной деятельности на диффузный сток 24
Контрольные вопросы и задания к главе 1 35

II. МОНИТОРИНГ ДИФФУЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ 38
2.1 Использование действующей системы мониторинга и средств наблюдений за диффузными источниками 38
2.2 Основные принципы организации мониторинга диффузного загрязнения 47
2.3 Стратегия мониторинга диффузного загрязнения 54
2.4 Выбор проекта (схемы) мониторинга диффузного загрязнения 57
Контрольные вопросы и задания к главе 2 62

III. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ДИФФУЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ: ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ 64
3.1 Модели для сельскохозяйственных территорий 70
3.2 Модели для урбанизированных территорий 74
3.3 Универсальные модели 76
Контрольные вопросы и задания к главе 3 91

Список литературы 93

I ИСТОЧНИКИ ДИФФУЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

1.1 Основные понятия и определения

Водный объект – сосредоточение природных вод на поверхности суши либо в горных породах, имеющее характерные формы распространения и черты режима [1].

Водосбор (бассейн) – часть земной поверхности, включая толщу почвогрунтов, откуда происходит сток вод в отдельную реку, речную систему или озеро [2].

Сток воды – перемещение воды в процессе ее круговорота в природе в форме стекания по земной поверхности (поверхностный С.) и в толще почво-грунта (подземный С.). Поверхностный сток делят на *склоновый* (происходящий по склонам местности) и *русловой* (по руслам рек и временных водотоков). Измеряется в $м^3/с$ и л/сут (*расход воды*), $л/с·км^2$ (*модуль стока*), $м^3$ и $км^3$ (*объем стока*) [2].

Качество воды – характеристика состава и свойств воды, определяющая пригодность ее для конкретных видов водопользования [3].

Загрязняющие вещества (ЗВ) – вещества в воде, вызывающие нарушение норм качества воды [3]. В зависимости от степени опасности для человека все ЗВ разделены на четыре класса: 1 класс - чрезвычайно опасные, 2 класс - высокоопасные, 3 класс - умеренно опасные, 4 класс - малоопасные [4].

Загрязнение вод – поступление в водный объект ЗВ, микроорганизмов или тепла [5].

Сточные воды – воды, отводимые после использования в бытовой и производственной деятельности человека [3]. Также **поверхностные** (дождевые, ливневые, талые) **сточные воды**, образующиеся в процессе выпадения дождей и таяния снега [6].

Точечные источники загрязнения – осуществляющие выпуск сточных вод (производственных и хозяйственно-бытовых) через систему специально организованных отводящих сооружений (главным образом трубопроводов) ограниченного размера. Местоположение выпуска стационарно и определено с применением единой государственной системы координат (по [7, 8]).

Диффузный сток (ДС) формируется в результате поступления ЗВ в водный объект от диффузных источников. Рассчитывается по формуле, кг: ДС = W· С, где W – объем водного стока за какой-либо период времени, $м^3$; содержание в водном объекте ЗВ «диффузного

поступления», кг/м^3 за этот же период времени. Также определяется как разница между общим стоком ЗВ с водосбора и их количеством, попадающим в водный объект со сбросами сточных вод точечных источников. Измеряется в кг/с, т/год, г/с·км^2.

Водоохранные мероприятия – мероприятия, направленные на предотвращение, ограничение и устранение последствий загрязнения, засорения и истощения водных объектов (по [3]).

Высокое загрязнение водного объекта – максимальное разовое содержание в нем ЗВ 1 и 2 классов опасности в концентрации, превышающей ПДК в 3-5 раз, для веществ 3 и 4 классов опасности – превышающей ПДК в 10-50 раз (для нефтепродуктов, фенолов, соединений меди, железа и марганца от 30 до 50 раз); снижение концентрации растворенного в воде кислорода до значений от 3 до 2 мг/л; увеличение величины биохимического потребления кислорода ($БПК_5$) от 10 до 40 мгO_2/л [9, 10].

Экстремально высокое загрязнение водного объекта – уровень загрязнения, при котором содержание ЗВ 1 и 2 классов опасности превышает ПДК в 5 и более раз, содержание ЗВ 3 и 4 классов опасности - в 50 и более раз; содержание растворенного кислорода снижается до значения 2 мг/л и менее, $БПК_5$ увеличивается до 40 мгO_2/л и выше [9, 10].

Источники вторичного загрязнения – объекты, содержащие накопленные ЗВ, внесенные в водные объекты в предшествующий период (например донные отложения).

Вторичное загрязнение вод - загрязнение вод в результате взмучивания донных отложений или перехода в растворенную форму ранее внесенных ЗВ, массового развития организмов или разложения мертвой биологической массы (по [5]).

Половодье – фаза водного режима реки, характеризующаяся наибольшей в году водностью, высоким и длительным подъемом уровня, обычно сопровождаемым выходом воды из русла на пойму. Вызывается главным источником питания реки. Для рек одной климатической зоны ежегодно повторяется в один и тот же сезон с различной интенсивностью и продолжительностью [2].

Паводок – быстрый, сравнительно кратковременный подъем уровня воды в каком-либо фиксированном створе реки, завершающийся почти столь же быстрым спадом и, в отличие от половодья, возникающий нерегулярно. Обычно возникает от дождей,

но в условиях неустойчивой зимы может быть обусловлен интенсивным кратковременным снеготаянием [2].

Самоочищение водных объектов – совокупность природных процессов, направленных на поддержание экологического благополучия водного объекта (по [5]). Самоочищение водных объектов происходит под воздействием следующих групп процессов: гидродинамических, физико-химических, биологических.

1.2 Идентификация диффузного загрязнения водного объекта

К первичным признакам ***диффузного загрязнения*** или высокого риска такого загрязнения, которые выявляются при визуальном обследовании водного объекта, его берегов и водосборной территории относятся (рис. 1.1):

- различимые пятна ГСМ на поверхности воды, твердых покрытиях, почве (рис. 1.1а);
- наличие складированных открытым способом, рассыпанных по поверхности земли мусора, отходов производства, навоза и помета, сыпучих строительных и лакокрасочных материалов, химикатов (рис. 1.1б);
- наличие участков с нарушенным почвенным покровом, открытой почвой в отсутствие травянистой и кустарниковой растительности вдоль берегов, осыпающиеся, оползающие берега, рытвины и промоины на склонах (рис. 1.1в);
- свободно пасущиеся животные в поймах рек и ручьев, имеющие доступ к воде (рис. 1.1г);
- шлейфы мутной воды вдоль берега или на акватории, формирование первичной ручейковой сети с высоким содержанием взвешенных веществ;
- высокое содержание пыли в воздухе, на поверхности твердых покрытий, листве, снежном покрове;
- общее неудовлетворительное санитарное состояние территории и др.

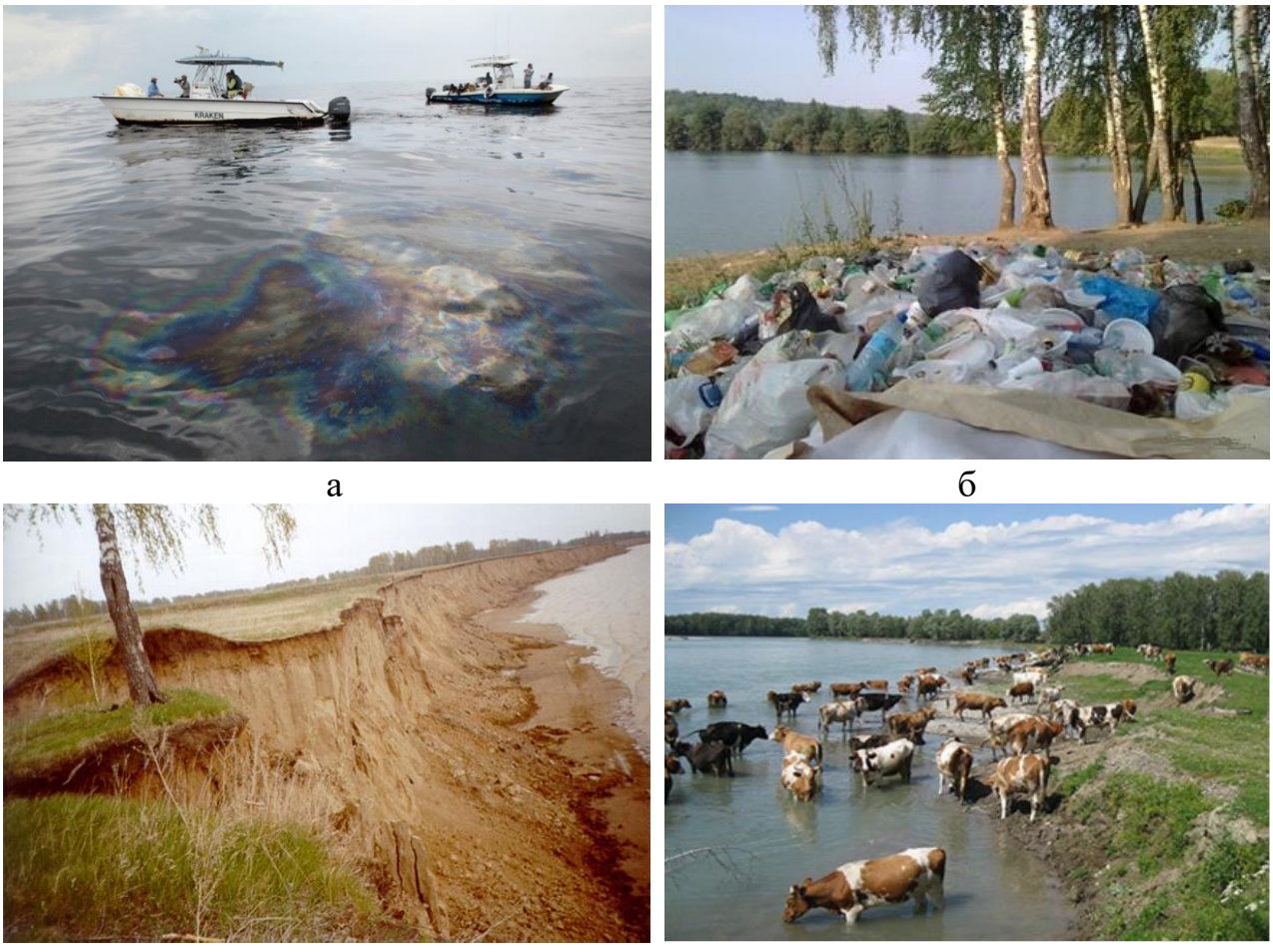
Основными признаками, которые могут свидетельствовать о наличии ***диффузного загрязнения*** водного объекта и/или его водосборной территории, по результатам инструментальных измерений являются:

- фиксируемое ухудшение качества воды в отсутствие на водосборе выпусков сточных вод хозяйственно-бытовых и промышленных предприятий;

- обнаружение в водном объекте ЗВ в концентрациях, заведомо превышающих потенциальные возможности источников сосредоточенного загрязнения;

- наличие в водном объекте ЗВ, нехарактерных для состава сточных вод, сбрасываемых через выпуски промышленных предприятий, расположенных на водосборной территории;

- выраженное ухудшение качества воды в периоды повышенной водности: половодья, дождевых и снего-дождевых паводков (особенно характерно для водотоков).



а б в г

Рис. 1.1. Признаки диффузного загрязнения водных объектов:
а – пятна ГСМ на поверхности воды; б – замусоренный берег;
в – осыпающиеся берега; г – пасущиеся в поймах рек животные

1.3 Типизация источников загрязнения водных объектов

С точки зрения формирования загрязнения водных объектов все источники можно классифицировать по различным признакам.

1.3.1 *По пространственной локализации и возможности количественной оценки формируемого загрязнения*

По пространственной локализации и возможности количественной оценки формируемого загрязнения разделяют (рис. 1.2):

- источники *сосредоточенного загрязнения* (*точечные источники*);
- источники *диффузного загрязнения* (*диффузные/неточечные источники*).

Источники ***сосредоточенного загрязнения*** представляют собой выпуски промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод (рис. 1.2а), а также различных технических дренажных вод. Данный вид источников легко идентифицируется и локализуется в пространстве. Нагрузка на водный объект от источника в этом случае оценивается напрямую посредством регулярного измерения таких показателей, как расход сточных вод, концентрации в них ЗВ и значения $БПК_5$. Эти показатели достаточно стабильны во времени (за исключением ливневой канализации, сток которой не только зависит от сезона, но может сильно варьировать в течение сезона). Но возможно и косвенное определение нагрузки от источника сосредоточенного загрязнения по данным о характеристиках технологических процессов и объемах водопотребления данного конкретного производства за конкретный период, об эффективности работы очистных сооружений. Поступление ЗВ в водные объекты с хозяйственно-бытовыми сточными водами расчетно определяется по нормам водопотребления и водоотведения с одного жителя в зависимости от степени благоустройства жилого сектора населенного пункта.

Точечные источники хорошо поддаются внутреннему (ведомственному) и внешнему (со стороны надзорных органов) контролю не только качества воды на выходе из источника или на отдельных стадиях производства, но и контролю за ходом самих производственных процессов и их управлением (менеджмент

качества). Вред водным объектам в данном случае идентифицируется по всему спектру характерных ЗВ.

а б

Рис. 1.2. Примеры точечных (а) и диффузного (б) источников загрязнения водных объектов

Точечные источники загрязнения, как правило, имеют малые линейные размеры, намного меньшие по сравнению с расстоянием, на которое распространяется влияние сброшенных сточных вод.

Размеры источников формирования ***диффузного загрязнения*** (рис. 1.2б) различаются, но в основном они значительно больше размеров точечных источников. Это могут быть небольшие участки, на которых в результате прошлой промышленной, коммерческой или другой деятельности сформировались объекты накопленного вреда окружающей среде. В некоторых случаях территория, на которой формируется диффузное загрязнение, может занимать почти всю водосборную площадь водного объекта (например неканализованные территории населенных пунктов, сельскохозяйственные угодья), а фронт поступления загрязнений в водный объект может растянуться на десятки и сотни километров [11]. Соотношение площадей водосборного бассейна и его части, занятой источником диффузного загрязнения, наиболее важно для водосборов малых рек, отличающихся наибольшей уязвимостью и низкой способностью к самоочищению.

Диффузные источники загрязнения можно условно разделить на два типа: линейные и площадные (рис. 1.3). Характерными примерами линейных источников являются: водный транспорт (рис. 1.3а); автомагистрали и трубопроводы, потенциальная опасность поступления загрязнений от которых существует на всем их протяжении, а наибольшая вероятность загрязнения воды возникает в местах пересечения с водными объектами. К площадным источникам

относятся, например, территории городской и сельской застройки, пашни (рис. 1.3б), пастбища, свалки (рис. 1.3в) и др.

а

б

в

Рис. 1.3. Примеры линейного (а) и площадных (б, в) источников диффузного загрязнения

Величина диффузного загрязнения зависит от степени хозяйственного освоения окружающего водный объект природного ландшафта и уровня экологической культуры ведения хозяйственной деятельности. Диффузное загрязнение связано, в основном, с загрязнением подстилающей поверхности водосбора, состоянием воздушной среды, почв, растительного покрова, типом использования земель и интенсивностью технологического воздействия на окружающую среду.

Возможности количественной оценки вклада диффузных источников в загрязнение водных объектов ограничены по следующим причинам:

- сложно идентифицировать источники и их расположение на водосборе, определить границы зоны влияния источника на водный объект;

- отсутствует четкое представление о механизмах формирования диффузного загрязнения и путях его поступления в водный объект;

- мониторинг влияния диффузных источников на качество воды водных объектов не проводится;

- отсутствуют надежные методики оценки формирования диффузного загрязнения.

Содержание ЗВ в водах, поступающих с единицы площади источника диффузного загрязнения, может быть ниже, чем от источника сосредоточенного загрязнения, однако вклад первых в загрязнение водных объектов может быть суммарно выше, поскольку общая площадь формирования диффузного загрязнения обычно значительно больше.

В ряде случаев точечные источники загрязнения окружающей среды также вносят вклад и в формирование диффузного загрязнения водных объектов. К таким случаям относятся те, при которых происходит опосредованное загрязнение водных объектов. Например, ЗВ, содержащиеся в выбросах в атмосферу промышленных предприятий, распространяются с воздушными потоками, сорбируются атмосферными осадками и, выпадая на земную поверхность, загрязняют снежный покров и почвы, охватывая большие территории, с которых впоследствии путем поверхностного и грунтового стока происходит диффузное загрязнение водных объектов (рис. 1.4).

а б

Рис. 1.4. Выбросы в атмосферу ЗВ предприятиями: а – «Печенганикель»; б – ТЭЦ г. Конаково (Тверская область)

1.3.2 *По способу (путям) поступления ЗВ от диффузных источников в водные объекты*

ЗВ от диффузных источников могут поступать с водосбора в водный объект:

✓ С поверхностным стоком (включающим внутрипочвенный и почвенно-грунтовый сток).

Основными видами хозяйственной деятельности, приводящими к трансформации химического состава поверхностного стока, являются: сельское хозяйство (растениеводство, животноводство); очистка коммунальных сточных вод на земледельческих полях орошения; горнодобывающая деятельность; деятельность, связанная со значительным выбросом ЗВ в атмосферу (металлургическое и химическое производство, производство энергии на тепловых электрических станциях и ряд других производств) (***Пример 1***); транспортное использование территорий (автомобильный, железнодорожный и трубопроводный транспорт).

Пример 1 **Источник [12]**

В результате многолетнего функционирования и выбросов в атмосферу Кольских медно-никелевых плавилен произошло загрязнение поверхностных водных объектов многими металлами, в большей степени – никелем и медью. По концентрациям последних в воде озер выделяются импактные зоны вокруг комбинатов «Североникель» и «Печенганикель». Самые низкие концентрации никеля и меди отмечаются в озерах, находящихся на удалении более 100 км.

Средние концентрации и диапазон значений (в скобках) металлов в водах озер, мкг/л, в различных районах Кольского полуострова

Металл	В радиусе до 30 км от комбинатов		На расстоянии 30-100 км от комбинатов		На расстоянии более 100 км от комбинатов
	«Печенганикель»	«Североникель»	«Печенганикель»	«Североникель»	
Ni	48	14	17	2.3	0.8
	(1.2-281)	(1-75)	(0.1-450)	(0.1-77)	(0.1-7.8)
Cu	5.5	6.8	1.3	1.4	0.9
	(1-20)	(1.8-17.9)	(0.2-4.3)	(0.1-20)	(0.2-6.1)

✓ При фильтрационной разгрузке в поверхностный водный объект загрязненных в процессе антропогенной деятельности подземных вод.

Загрязнение подземных вод наблюдается в местах расположения бывших рудников при их мокрой консервации, недействующих шахт, в местах накопленного экологического ущерба, крупных аварий на химических производствах и предприятиях нефтедобычи и нефтепереработки и др. Загрязнение токсичными химическими

веществами может происходить вне границ водосбора рассматриваемого водного объекта, при наличии гидравлической связи между соседними бассейнами подземных вод.

✓ Из атмосферы в результате сухого осаждения и мокрого выпадения ЗВ непосредственно на водную поверхность.

Данный тип поступления ЗВ зависит от направления господствующих ветров и удаленности водного объекта от крупных промышленных предприятий, ТЭС, аэропортов и др.

✓ Из донных отложений. При определенных физико-химических и гидравлических условиях часть ЗВ, накопленных в донных отложениях, может переходить из твердой фазы в водную и служить источником «вторичного» загрязнения.

✓ В процессе непосредственного контакта с водой (антропогенная деятельность в водном объекте и на пойме). Загрязнение происходит при использовании поверхностных водных объектов для навигации и стоянки судов, эксплуатации гидротехнических сооружений, во время сплава древесины, эксплуатации и содержания водных путей, при выполнении работ в акватории речного порта и при добыче нерудных полезных ископаемых, строительстве мостов и прокладке трубопроводов, при рекреационном использовании водного объекта.

1.3.3 *По возможности нейтрализации негативного воздействия диффузного загрязнения*

По возможности нейтрализации негативного воздействия диффузного загрязнения выделяют:

✓ Источники диффузного загрязнения, которые могут быть ликвидированы, и для этого имеются технические и/или организационные возможности или образование которых можно предотвратить. В эту группу входят, прежде всего:

- свалки (санкционированные и несанкционированные);
- полигоны твердых коммунальных отходов.

✓ Источники диффузного загрязнения, загрязненный сток от которых может быть локализован и очищен. Примерами таких источников являются:

- селитебные и урбанизированные территории;
- животноводческие, птицеводческие фермы и площадки складирования навоза;

- территории промышленных предприятий, топливозаправочных станций и стоянки транспортных средств.

Причины того, что локализация диффузного загрязнения от этих источников и последующая очистка сточных вод не проводятся, носят, как правило, либо организационный (включая отсутствие законодательной базы), либо экономический (отсутствие достаточных средств и стимулов у субъектов РФ и у муниципалитетов) характер.

✓ Источники диффузного загрязнения, поступление ЗВ от которых не может быть полностью локализовано, но существуют мероприятия, которые позволяют снизить негативное влияние на водные объекты. К этой категории относятся большие площадные и линейные источники:

- сельскохозяйственные угодья: богарные, осушаемые и орошаемые земли;
- территории и акватории больших портов;
- крупные промышленные зоны и места добычи полезных ископаемых;
- зоны рекреации;
- площадки строительства, затрагивающие акваторию (мосты, переходы и проч.), изменение формы речных русел;
- автомобильные и железные дороги.

✓ Источники, диффузного загрязнения, на которых проведение водоохранных мероприятий технически невозможно. К этой категории относятся диффузные источники, имеющие природное или антропогенно-природное происхождение (***Пример 2***).

1.4 Особенности формирования диффузного загрязнения водных объектов

Существует ряд особенностей, влияющих на формирование объема и качественного состава диффузного стока ЗВ, а также возможность его контроля и снижения поступления в водный объект.

✓ На процесс образования диффузного загрязнения значительное влияние оказывают природные факторы – физико-географические условия водосборного бассейна. Природными факторами (увеличения или снижения) диффузного загрязнения являются следующие [16]:

- климатические (осадки, испарение, сумма положительных температур, снегозапасы, интенсивность снеготаяния, направление и скорость ветра, др.);

Пример 2 **Источник [13-15]**

Особенностью геологического строения территории Южного Урала является широкое распространение рудных месторождений и значительная концентрация рудогенных элементов в горных породах. Почвы наследуют химический состав почвообразующих горных пород. В почве металлы включаются в состав гумусовых веществ, образуя с ними прочные комплексы, и выводятся из них сотни лет. Это обусловливает повышенное **природное фоновое** содержание металлов в подземных и поверхностных водах.
Промышленное освоение территории Южного Урала, начавшееся более 300 лет назад, происходило без учета экологических ограничений и было связано с разработкой рудных месторождений. Первый горный завод на Урале был построен здесь в 1701 году. Во второй половине XVIII века здесь уже действовали 52 железоделательных и медеплавильных завода. «Древние» антропогенно-преобразованные горнорудные территории с нарушенными ландшафтными и гидрогеологическими условиями являются постоянно действующими **антропогенно-природными** диффузными источниками поступления металлов в водные объекты.

- почвенные (тип почв, содержание гумуса, гранулометрический состав, влажность почвы, подверженность эрозии и др.) (***Пример 3***);

Пример 3 **Источник [17]**

Влияние **почвенных** факторов на содержание ТМ в диффузном стоке:

✓ **Содержание гумуса в почве.** Гумус обладает высокой сорбционной способностью, а гумусовые вещества образуют с ТМ малоподвижные соединения, тем самым предотвращая их вымывание из почвы. Например, гуминовые кислоты 1 га почвы, содержащей 4% гумуса, могут связать (предотвратить поступление в водные объекты) около 18 тыс. кг железа, 4500 кг свинца, 1500 кг меди, 1000 кг цинка, 900 кг марганца. Типы почв с более низким содержанием гумуса (например подзолистые) характеризуются более значительным вымыванием из них металлов.

✓ **Кислотность почвы (pH)** влияет на подвижность ТМ в почвенном профиле и их вымывание с почвенным раствором. При увеличении кислотности растворимость ТМ возрастает, и миграция их в почвенный раствор и растения увеличивается.

✓ **Гранулометрический и минералогический состав почвы** влияет на емкость катионного обмена, что обусловливает различную подвижность ТМ и их поступление в почвенный раствор. Почвы тяжелого гранулометрического состава имеют большую площадь поверхности частиц, поэтому подвижность ТМ в таких почвах снижается. Аналогично, если в состав почв входят минералы с невысокой емкостью катионного обмена (каолиниты), то вымывание из них ТМ происходит быстрее, чем из почв, в состав которых входят минералы монтмориллонитовой группы.

✓ **Уплотнение почвы** увеличивает подвижность ТМ. Так, увеличение плотности почвы с 0,6-1,0 до 1,3-1,8 г/см^3 усиливает подвижность ТМ в несколько раз.

- геоморфологические (рельеф территории, высотные отметки и др.);
- гидрографические (уклон водосбора, озерность, залесенность (***Пример 4***), заболоченность, модуль поверхностного стока и др.);

Пример 4 **Источник [18]**

Влияние наличия защитных лесных насаждений на свойства почвы и формирование диффузного стока

Показатели	Открытая территория	Агролесоландшафт
Запасы воды в снеге, мм	70-80	110-120
Впитывание воды в почву, мм	58-63	100-108
Поверхностный сток, мм	19-20	6-7
Смыв почвы, $м^3$/га	3,0-4,0	0,5-0,7

- гидрогеологические (глубина залегания грунтовых вод, коэффициент фильтрации, модуль подземного стока);
- биологические (тип растительности, вид выращиваемой сельскохозяйственной культуры и др.).

✓ Тесная зависимость между количеством стекающего по водосбору водного стока и величиной диффузного стока ЗВ приводит к тому, что наибольшие его значения формируются в периоды повышенной водности – половодья и паводки.

Так, в весеннее половодье – период наибольшей в году водности для большинства рек России – наблюдается наибольшее число случаев ВЗ и ЭВЗ водных объектов, связанных со значительным поступлением ЗВ от диффузных источников (рис. 1.5).

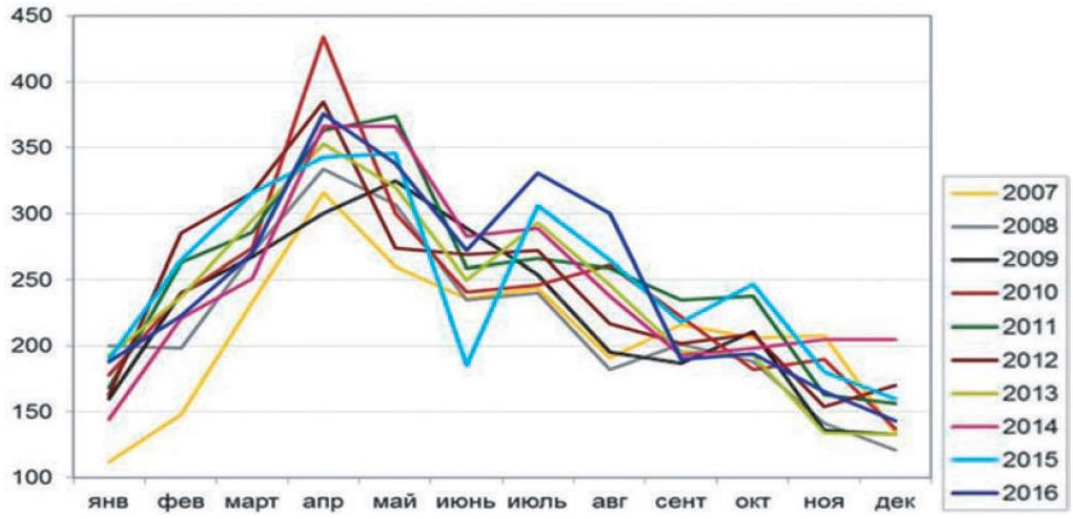


Рис. 1.5. Внутригодовое распределение случаев ВЗ и ЭВЗ водных объектов на территории Российской Федерации за период 2007-2016 гг. [19]

Во время выпадения дождей наблюдается «залповый» характер поступления диффузного загрязнения – за короткий промежуток времени (продолжительность дождя) в водный объект смывается значительное количество ЗВ.

В засушливые периоды диффузный сток почти не формируется, поэтому наблюдается его большая внутригодовая изменчивость для одного и того же диффузного источника.

✓ Формирование диффузного загрязнения происходит непреднамеренно (опосредованно) или просто не рассматривается как возможное последствие хозяйственной деятельности. Например, промышленное предприятие, осуществляющее выброс в атмосферу ЗВ, лишь удаляет с территории предприятия отходы, образовавшиеся в процессе производства. Предприятие не учитывает, что осевшие на поверхность водосбора ЗВ, пусть даже и на очень далеком расстоянии от места выброса, примут участие в формировании диффузного загрязнения водного объекта.

✓ На формирование диффузного загрязнения большое влияние оказывают субъективные факторы. Именно хозяйствующий на земле субъект принимает решение о том, в какие сроки, каким образом и какие удобрения вносить на сельхозугодья; каким образом вспахать землю, какие сельскохозяйственные культуры выращивать на тех или иных угодьях; насколько тщательно соблюдать технологию хранения и транспортировки удобрений на поля; в каких местах пасти скот; проектировать ли ливневую канализацию в городе и др. (***Примеры 5*** и ***6***).

Пример 5 **Источник [17]**

Для повышения продуктивности растений и качества растительной продукции вместо минеральных удобрений можно использовать **микробиологические удобрения**, которые представляют собой препараты, содержащие живые культуры азотфиксирующих микроорганизмов. Удобрения разрабатываются на основе бактерий рода Rhizobium, Azotobacter и др. Микроорганизмы образуют физиологически активные вещества – фитогормоны, антибиотики и другие продукты метаболизма, подавляющие рост патогенной микрофлоры. Кроме того, микроорганизмы стимулируют увеличение доступности макро- и микроэлементов для растений, увеличивают содержание в них белка и витаминов, ускоряют созревание.

Применение бактериальных удобрений предотвращает загрязнение водных объектов нитратами, значительно уменьшает применение пестицидов и повышает продуктивность (в среднем на 20-25%) сельскохозяйственных культур. Микробные препараты изготовляют в гранулированной или порошкообразной форме на основе торфа, в виде масляной эмульсии или замороженного концентрата клеток. Крупнейшие производители микробных удобрений – Австрия, Индия, США.

✓ Контроль за поступлением ЗВ от источников диффузного загрязнения намного более сложен в техническом и организационном плане, по сравнению с контролем за поступлением ЗВ от точечных источников. Более того, не существует и универсальной системы мониторинга за неточечными источниками, поскольку они весьма разнообразны и специфичны.

Пример 6 **Источник [20]**

Влияние различных типов угодий и видов пашни на величину водного стока половодья

Наименование угодий и видов пашни	Сток в относительных величинах	Наименование угодий и видов пашни	Сток в относительных величинах
Зяблевая вспашка	1,0	Залежь и трава	2,0
Зяблевая вспашка поперек склона	0,3	Весенняя вспашка	2,0
Пласт	0,2	Озимые	3,0

✓ Снижение поступления ЗВ от диффузных источников может быть достигнуто за счет внедрения эффективных методов управления и экологически ориентированных практик хозяйственной деятельности в пределах водосборной территории, а также изменения условий формирования поверхностного или грунтового стока.

1.5 Основные ЗВ «диффузного поступления» и их влияние на экологическое состояние водных объектов

От точечных и диффузных источников в водные объекты могут поступать одни и те же ЗВ. Выделим среди них те, которые являются приоритетными при организации мониторинга и внедрении водоохранных мероприятий от диффузного загрязнения.

1.5.1 *Взвешенные вещества*

Основные источники: уличные территории, дороги и автомагистрали, железные дороги, строительные площадки и иные объекты строительной деятельности, осаждение выбросов промышленных предприятий в составе атмосферных осадков, переработка берегов, взмучивание донных отложений, почвенная эрозия.

Воздействие на экологическое состояние водных объектов и другие эффекты.

Повышение мутности и уменьшение прозрачности водного объекта, что приводит к снижению фотосинтетической активности водной растительности, сокращению её численности и биоразнообразия. При высокой мутности усиливается прогрев верхних слоев воды, что ухудшает поступление кислорода из воздуха в нижние слои (в большей степени это характерно для водоемов). Забивают жабры рыб и затрудняют их жизнедеятельность. Заиление участков нерестилищ. Высокая сорбционная емкость способствует аккумуляции биогенных элементов и токсикантов, которые выносятся в водный объект. Ухудшение эстетической и рекреационной привлекательности водного объекта.

1.5.2 *Вещества, содержащие биогенные элементы – азот и фосфор*

Основные источники: удобрения, поступающие с сельскохозяйственных территорий, площадки складирования отходов жизнедеятельности животных, выпас скота (пастбища), фекальное загрязнение городских газонов и лужаек, атмосферные осаждения, выхлопы автотранспорта, моющие средства (мойка дорог, автомобилей, судовых корпусов и палуб), почвенная эрозия, рекреационная деятельность по берегам рек и водохранилищ.

Воздействие на экологическое состояние водных объектов и другие эффекты.

Способствуют эвтрофированию водоемов, цветению воды, снижению концентрации растворенного в воде кислорода и развитию гнилостных процессов, приводит к росту содержания органических веществ, появлению токсичных веществ – продуктов жизнедеятельности или разложения цианобактерий, деградации популяций высших гидробионтов, вызывает появление неприятных запахов.

1.5.3 *Тяжелые металлы (медь, свинец, цинк, кадмий и др.)*

Основные источники: автотранспорт, осаждения из атмосферы, промышленные зоны, места добычи полезных ископаемых, территории вокруг предприятий цветной металлургии, в том числе загрязненные почвы, минеральные удобрения, почвенная эрозия, окисление металлических поверхностей, сжигание металлсодержащих материалов, истирание движущихся частей транспортных средств,

элементов двигателей внутреннего сгорания, окрашенных поверхностей.

Воздействие на экологическое состояние водных объектов и другие эффекты.

Имеют способность к накоплению в тканях животных и растительных организмов и миграции по трофическим цепям внутри экосистемы и за её пределы. Накапливаются в тканях гидробионтов и вызывают длительный токсический стресс у человека.

1.5.4 *Бактериальное загрязнение*

Основные источники: территории парковых и лесопарковых зон, скверы, газоны, территории улиц, места протечек канализационных труб, утечки из коллекторов хозяйственно-бытовых и ливневых сточных вод в особенности в случае общесплавной системы канализации, отходы жизнедеятельности домашних животных, площадки складирования отходов животноводства и птицеводства, септики, свалки хозяйственно-бытовых отходов.

Воздействие на экологическое состояние водных объектов и другие эффекты.

Снижение рекреационной привлекательности и общей санитарно-экологической безопасности водных объектов.

1.5.5 *Органические вещества, оцениваемые по показателям БПК и ХПК*

Основные источники: зеленые территории частных хозяйств, остатки продуктов животноводства и жизнедеятельности домашних животных (выгульные площадки и места складирования помета и навоза), бытовые органические отходы.

Воздействие на экологическое состояние водных объектов и другие эффекты.

Высокое содержание органических веществ приводит к снижению концентрации растворенного кислорода, запуску процессов анаэробного разложения загрязнений, появлению неприятных запахов, снижению эстетической привлекательности водного объекта, ограничению возможностей отдыха у воды, купания, заморным явлениям (***Пример 7***).

1.5.6 *Нефтепродукты*

Основные источники: дороги и автомагистрали, парковки, авто- и судоремонтные мастерские, бензоколонки, мойка автотранспорта на необорудованных площадках, судоходство, территории портов, утечки при транспортировке, аварийные ситуации.

Воздействие на экологическое состояние водных объектов и другие эффекты.

Токсичность данных соединений приводит к сокращению численности зоопланктона и бентоса. Обладают способностью к аккумуляции в тканях, создают воздухонепроницаемую пленку на значительных площадях, препятствующую проникновению кислорода в воду. Неблагоприятное воздействие нефтепродуктов сказывается на организме человека, животном мире, водной растительности, физическом, химическом и биологическом состоянии водоема. Входящие в состав нефтепродуктов низкомолекулярные алифатические, нафтеновые и особенно ароматические углеводороды оказывают токсическое и, в некоторой степени, наркотическое воздействие на организм, поражая сердечно-сосудистую и нервную системы. Наибольшую опасность представляют полициклические конденсированные углеводороды типа 3,4-бензапирена, обладающие канцерогенными свойствами. Нефтепродукты обволакивают оперение птиц, поверхность тела и органы гидробионтов, вызывая заболевания и гибель.

Пример 7

БПК - биохимическое потребление кислорода - представляет собой количество кислорода, потребляемого за определенное время при биохимическом (бактериальном) окислении органических веществ, содержащихся в воде, в аэробных условиях. Различают значение $БПК_5$, соответствующее потреблению кислорода за 5 суток (при температуре 20°С окисляется около 70% органических веществ) и $БПК_{полн}$ ($БПК_{20}$) - полное биохимическое потребление кислорода, обычно соответствующее потреблению кислорода за 15-20 суток (окисляется 99% органических веществ). Выражается в мг/л молекулярного кислорода.

ХПК - химическое потребление кислорода – количество кислорода, потребляемого при химическом окислении содержащихся в воде органических и минеральных веществ под действием окислителей, выражается в мг/л атомарного кислорода. ХПК отождествляется с бихроматной окисляемостью, значение которой определяется при воздействии на воду сильного окислителя (обычно бихромата калия $K_2Cr_2O_7$) в кислой среде.

1.5.7 *Пестициды*

Основные источники: сельскохозяйственные поля, коллекторно-дренажные воды орошаемых территорий, садовые товарищества и приусадебные участки, вторичное загрязнение из донных отложений.

Воздействие на экологическое состояние водных объектов и другие эффекты. Токсичность данных соединений приводит к сокращению численности зоопланктона и бентоса. Обладают способностью к аккумуляции в тканях гидробионтов (***Пример 8***).

> ***Пример 8***
>
> Пестициды подразделяются на два основных класса: хлорорганические и фосфорорганические.
> Важнейшей отличительной чертой большинства **хлорорганических** соединений является стойкость к воздействию температуры, солнечной радиации и других факторов и нарастание концентрации в последующих звеньях биологической цепи (например, содержание ДДТ в гидробионтах может превышать содержание его в воде на один-два порядка). Хлорорганические инсектициды обладают значительно большей токсичностью для рыб.
> **Фосфорорганические** пестициды обладают относительно малой химической и биологической устойчивостью. Большая часть их разлагается в растениях, почве, воде в течение нескольких месяцев.

1.5.8 *Стойкие органические загрязнители (СОЗ)*

Вещества относится к классу циклических хлорорганических соединений, обладающих рядом специфических свойств, которые делают СОЗ особо опасными экотоксикантами (***Пример 9***):

- высокой стойкостью к физическим, химическим и биологическим факторам;
- способностью долго циркулировать в окружающей среде;
- глобальной распространенностью;
- повышенной степенью биоаккумуляции за счет исключительно высокой гидрофобности и липофильности, особенно на высших уровнях трофических сетей;
- низкой скоростью метаболической деградации;
- способностью оказывать токсическое действие на организмы в крайне малых дозах.

Основные источники: диэлектрические жидкости в трансформаторах и конденсаторах, антипирены, смазочные и гидравлические масла, безводная бумага, добавки к краскам и пластмассам и т.д. Источниками поступления в водные объекты являются: сточные воды промышленных предприятий; атмосферный

перенос и выпадения с осадками; поверхностный сток с водосборной территории.

Пример 9

В настоящее время к **СОЗ** относят 21 индивидуальное соединение или их группы. Учитывая высокую экологическую опасность в 2001 г. в Стокгольме была принята Глобальная международная конвенция о запрещении производства и использования СОЗ, которую Россия подписала в 2002 г., а в 2011 г. её ратифицировала.
Несмотря на запрет, СОЗ до сих пор продолжают поступать в окружающую среду и циркулировать в ней. Причиной этого служит большой запас оборудования, материалов и непосредственно самих СОЗ, которые были выведены из использования, но не утилизированы, а продолжают храниться, зачастую без соблюдения необходимых условий безопасности.

Воздействие на экологическое состояние водных объектов и другие эффекты.

Главная опасность СОЗ заключается в хронических токсических эффектах. Они оказывают иммунотоксическое и тератогенное действие, нарушают репродуктивную и пищеварительную функции, поведение, вызывают паралич конечностей, заболевание кожных покровов и отеки, являются активными промоторами карциномы печени, опухолевых новообразований и предшествующим им нарушениям метаболизма.

1.6 Факторы и механизмы влияния отдельных видов хозяйственной деятельности на диффузный сток

1.6.1 *Сельское хозяйство*

В сельскохозяйственном производстве (земледелии и животноводстве) к формированию диффузного загрязнения приводят следующие виды деятельности (рис. 1.6):

- нарушение технологии хранения и утилизации удобрений и отходов производства (навоза, помета и др.), потери при транспортировке, выбор ненадлежащих мест складирования (рис. 1.6а-в);

- неправильные организация кормления животных и выбор мест их выгула, устройство водопоя непосредственно из водного объекта;

- внесение удобрений без запашки или/и в неурочное время, например в период дождей, внесение удобрений и навоза в избыточном для растений количестве;

- использование пестицидов для борьбы с вредителями и сорняками;

- чрезмерная эксплуатация пастбищ (перевыпас скота), приводящая к деградации растительного покрова, нарушению почвенного покрова и эрозионным процессам;

- вспашка полей до уреза воды, отсутствие буферных зон (полос) с нетронутым травостоем, неправильное направление распашки склонов;

- поступление загрязнений с полей, сформированных на месте старых мелиоративных систем.

а б в г

Рис. 1.6. Виды деятельности и источники в сельскохозяйственном производстве, приводящие к диффузному загрязнению водных объектов: складирование на открытом грунте минеральных (а) и органических (б) удобрений; сток навоза с животноводческой фермы (в); эрозия пахотных земель (г)

Основными источниками диффузного загрязнения в сельскохозяйственном производстве являются:

- эрозия пахотных земель (рис. 1.6г);

- грунтовые воды с растворенными удобрениями и пестицидами;

- орошаемые и осушаемые угодья;
- навозохранилища и буртовые площадки;
- места выгула животных и складирования отходов переработки;
- рыборазводные пруды.

Основные ЗВ: азот-, фосфор- и калийсодержащие вещества, пестициды, взвешенные вещества, патогенные микроорганизмы, тяжелые металлы.

1.6.2 *Урбанизированные территории (города, поселки и пригородные зоны)*

Среди негативных факторов как прямого, так и косвенного влияния на формирование диффузного загрязнения можно выделить (рис.1.7):

- преобладание искусственных трудно проницаемых для талых и дождевых вод покрытий, способствующих увеличению коэффициента поверхностного стока и смыва ЗВ (крыши домов, асфальтирование и мощение улиц) (рис. 1.7а);
- уплотнение, радикальное изменение структуры и преобразование естественного почвенного покрова;
- использование реагентов для борьбы с гололедом и ускорения снеготаяния;
- развитие инфраструктуры, строительные и раскопочные работы, связанные с перемещением и складированием большого количества грунта и строительных материалов;
- фекальное загрязнение поверхностных и грунтовых вод, образующееся в результате выгула домашних питомцев и утечек из септиков;
- излив сточных вод на поверхность в периоды дождей и таяния снега при отсутствии раздельных систем хозяйственно-бытовой и дождевой канализации;
- формирование пространств с открытым (незадернованным) грунтом, в особенности вдоль линейных объектов транспортной и иной инфраструктуры (обочины автомобильных и железных дорог, ЛЭП, трубопроводы и др.);
- использование моющих средств для мытья дорожных покрытий, мойка автотехники в неустановленных местах;
- незаконные водовыпуски с частных домовладений (рис.1.7б);

- ненадлежащее санитарное состояние внутригородских территорий, улиц, зон массового отдыха населения, образование стихийных свалок хозяйственно-бытового мусора, в том числе в прибрежной зоне водотоков, протекающих по территории населенных пунктов.

Основными источниками диффузного загрязнения в городском хозяйстве являются:

- поверхностный сток с застроенных территорий;
- загрязнённые грунтовые воды жилой застройки и полигонов ТКО;
- поверхностный сток с вновь осваиваемых территорий при строительстве прокладки коммуникаций и проч.

Основные ЗВ: ГСМ, топливные смеси и токсичные химические вещества из двигателей транспортных средств, тяжелые металлы, антигололедные реагенты, взвешенные вещества, патогенные микроорганизмы, вирусы, СПАВ.

а б

Рис. 1.7. Факторы формирования диффузного загрязнения водных объектов на урбанизированных территориях: а – трудно проницаемые для дождевых вод покрытия (г. Конаково летом 2019 г.); б – незаконные выпуски с частных домовладений (Тверская область)

1.6.3 *Транспорт (включая судоходство и трубопроводы)*

К факторам, влияющим на формирование диффузного загрязнения природных вод, относятся:

- волновое воздействие от проходящих судов и вызванная им абразия берегов с последующим выносом продуктов разрушения в водный объект;

- утечки ГСМ и топлива при заправке, обслуживании транспортных средств и возможных аварийных ситуациях как на дорогах, так и на трубопроводах вблизи или при пересечении водных объектов;

- поверхностный смыв (ливневой сток) с автомобильных дорог, территории пристаней, портов, судоремонтных предприятий, топливозаправочных станций;

- утечки и/или сбросы подсланевых (льяльных) вод, содержащих горюче-смазочные материалы, судовых сточных вод и разливы нефтепродуктов, включая случаи самостоятельного обслуживания владельцами двигателей катеров и лодок;

- очистка и мойка корпусов и судовых палуб, лакокрасочные работы;

- формирование пространств с открытым (незадернованным) грунтом, заброшенных территорий и «неудобий», в особенности вдоль линейных объектов транспортной инфраструктуры (обочины автомобильных и железных дорог, ЛЭП, трубопроводы);

- строительные работы, сопровождающиеся перемещением большого количества грунта и строительных материалов, движением и стоянкой строительной техники и связанные с ними почвенная эрозия, нарушение целостности почвогрунтов и их загрязнение горюче-смазочными материалами, нефтепродуктами, строительным мусором;

- формирование грязе-капельных и пылевых облаков при эксплуатации грунтовых дорог, в особенности в условиях засушливого климата с последующим ветровым переносом.

Основными источниками диффузного загрязнения в транспортном хозяйстве являются:

- поверхностный сток с автомагистралей;

- выхлопные газы и продукты истирания дорог и механических частей;

- места аварийных ситуаций (рис. 1.8а);

- несанкционированный сброс подсланевых вод, утечки ГСМ с судов;

- поверхностный сток с аэродромов, портов, стоянок автотехники.

Основные ЗВ: пыль; сажа; ГСМ; нефтепродукты и токсичные химические вещества из двигателей; ТМ, содержащиеся в краске для корпусов судов; взвешенные вещества; СПАВ; растворители.

а

б

в

г

д

е

Рис. 1.8. Диффузные источники загрязнения водных объектов по видам хозяйственной деятельности: а – транспорт; б – промышленность; в, г – рекреационное водопользование; д – обрушение берегов; е – дночерпательные работы

1.6.4 *Промышленное производство, добыча минеральных ресурсов и энергетика*

Существуют различные отраслевые особенности формирования диффузного загрязнения.

Цветная металлургия является лидирующей отраслью по объему выбросов ЗВ в атмосферу. В их составе присутствуют диоксид серы, оксид углерода, серная кислота, ТМ, оксиды азота и др. Источниками

образования вредных выбросов являются различные виды печей, дробильно-размолочное оборудование, места погрузки и выгрузки материалов, сушильные агрегаты, открытые склады.

Крупные комбинаты, относящиеся к данной отрасли, представляют собой наиболее мощные (по интенсивности и разнообразию ЗВ) источники загрязнения почв (хвосто-, шлако- и шламохранилища, отвалы вскрышных и вмещающих пород), а через них подземных и поверхностных вод.

Химическая и *нефтехимическая промышленность* имеют в своем составе около трех десятков отраслей и характеризуется многообразием выпускаемой продукции, высокой скоростью образования и токсичностью отходов (различного рода шламы, ртутьсодержащие отходы, отработанные кислоты, фосфогипс и многое др.).

ЗВ, поступающие в атмосферу, включают: оксид углерода летучие органические соединения, оксид азота, серную кислоту, углеводороды, бензол, ацетон и др.

К основным источникам загрязнения атмосферы в *машиностроении* следует отнести: литейное производство, цеха механической обработки, сварочные и покрасочные цеха. ЗВ, присутствующие в выбросах, помимо основного набора компонентов, включают легкие органические соединения, ксилол, толуол, аммиак, ТМ.

Деревообработка и *целлюлозно-бумажное производство* являются источниками загрязнения воды, воздуха и почв диоксинами и подобными им высокотоксичными веществами. Концентрации этих веществ в компонентах природной среды резко возрастают вокруг крупных производственных комплексов.

Значительный вклад в загрязнение компонентов окружающей среды с последующим загрязнением водных объектов вносит *производство строительных материалов*: цементные, асбоцементные, известковые, химорганические производства, предприятия по производству кровельных и изоляционных материалов, керамзитобетонные заводы, карьеры по добыче нерудных строительных материалов. Вокруг заводских территорий образуются хорошо выраженные (радиусом до 2 км) зоны повышенного содержания пыли с включениями цемента, гипса, асбеста, кварца и других вредных веществ. Кроме того, большое количество ЗВ

попадает окружающую среду в результате взрывных работ и добыче природного строительного сырья.

Нефтедобывающая промышленность влияет на качество природных вод через изъятие и загрязнение земельных ресурсов и почв, выбросы в атмосферу, захоронение отходов бурения, разливы нефтепродуктов при добыче и транспортировке как по внутрипромысловым, так и по магистральным трубопроводам.

При *добыче, переработке и транспортировке газа* наибольшему первичному загрязнению подвергается атмосферный воздух. При газодобыче от общего объема отходящих веществ улавливается и очищается всего лишь около 20%. В атмосферу попадают такие вещества как оксид углерода, углеводороды, диоксид серы, твердые частицы, сажа, летучие органические соединения, оксид азота.

Источниками диффузного загрязнения в *угледобывающей промышленности* являются места производства буровзрывных работ, двигатели внутреннего сгорания и котельные, угольные склады и породные отвалы, загрязненные территории, формирующиеся вокруг предприятий отрасли в результате добычи и обогащения угля и сланца.

Черная металлургия относится к лидерам отечественной промышленности в отношении загрязнения атмосферного воздуха, а через него и других элементов природной среды (почв, поверхностных и грунтовых вод) оксидом углерода, диоксидом серы, оксидом азота, углеводородами, сажей и проч. Кроме того, отрасль характеризуется ежегодным образованием сотен миллионов тонн производственных отходов.

Влияние *объектов энергетики* на качество воды происходит во многом благодаря первичному загрязнению воздушного бассейна. Основная часть энергии в нашей стране вырабатывается за счет сжигания и/или переработки угля, нефти, газа, горючих сланцев и торфа. Основная доля (до 90% в отрасли) загрязнения атмосферы приходится на теплоэлектростанции (ТЭС), крупнейшими загрязнителями также являются ТЭЦ. В выбросах присутствуют такие вещества как диоксид серы, оксид углерода, оксиды азота, летучие органические соединения, формальдегид, аммиак, азотная кислота, метан, бенз(а)пирен.

Энергетические попуски гидроэлектростанций (ГЭС) оказывают влияние на переформирование берегов водохранилищ, увеличивая интенсивность размыва почвогрунтов, поступление взвешенных веществ, почвенной органики в водные объекты (см. также п.1.6.6).

В целом влияние на качество природных вод оказывают следующие факторы:

- отсутствие или ненадлежащее обустройство мест временного складирования промышленных отходов, а также отсутствие или недостаточность производственного контроля при обращении с такими отходами (рис.1.8б);
- загрязнение грунтовых вод через водоотливы при разработке рудных, угольных и иных месторождений;
- фильтрационные разгрузки от хранилищ жидких и твердых отходов, отвалов горных пород, рассолосборников, прудов-накопителей дождевых и сточных вод;
- формирование обширных загрязненных зон вокруг предприятий от атмосферных выбросов;
- поверхностный сток с территории промышленных площадок при нарушенной системе ливневой канализации, отсутствии перехватывающих лотков;
- несовершенство и нарушение герметичности технологического оборудования;
- преобразование ландшафтов в результате изыскательских, геологоразведочных и буровзрывных работ;
- вырубка лесов в поймах рек, нарушение почвенного и растительного покрова в процессе лесозаготовительных работ и транспортировки древесины.

Основные диффузные источники в промышленном производстве и добыче природных ресурсов следующие:

- загрязнённые атмосферные осадки и грунтовые воды;
- отвалы горных пород и промышленных отходов;
- поверхностный сток с промышленных площадок;
- хранилища жидких и твердых промышленных отходов;
- территории лесозаготовительных предприятий;
- шахтные и карьерные воды;
- места добычи нерудных материалов из русла водного объекта.

1.6.5 *Рекреация и любительское рыболовство*

К основным факторам негативного воздействия различных видов отдыха (***Пример 10***) относятся:

- образование хозяйственно-бытовых отходов, включая пластиковую тару, банки, бутылки, полиэтиленовые пакеты, окурки, ветошь, фрагменты рыболовных снастей и проч.;

- неорганизованные стоянки автотранспорта на берегах и акватории (на льду) рек и водохранилищ в местах любительского рыболовства, сопровождающиеся мойкой автомашин на берегу, утечками ГСМ и нефтепродуктов;

- прикормка при рыбной ловле и чистка выловленной рыбы на берегу водного объекта;

- смыв пищевых отбросов, хозяйственно-бытовых отходов и фекалий (рис. 1.8в);

- вторичное загрязнение при взмучивании донных отложений;

- уничтожение древесно-кустарниковой растительности, деградация растительного и почвенного покрова и обеднение видового и количественного состава гидробионтов. Эти процессы ослабляют барьерную функцию элементов природной экосистемы в отношении диффузного загрязнения и снижают способность водных объектов к самоочищению.

Основные источники диффузного загрязнения в рекреационном водопользовании:

- места организации несанкционированных свалок, кострищ. туалетов, мойки автомобилей (рис. 1.8г);

- места любительского рыболовства;

- использование маломерного флота и водный туризм;

- стоянки автотранспорта на берегу и акватории водного объекта (в т. ч. на льду).

Основные ЗВ: взвешенные вещества, биогенные элементы и СПАВ, патогенные микроорганизмы и вирусы, ГСМ, хозяйственно-бытовые отходы.

Пример 10

Различают две большие группы видов отдыха: с преимущественным **использованием территории** и с преимущественным **использованием акватории**.

К первой группе относятся организованный отдых в учреждениях отдыха, стационарный и неорганизованный пеший туризм, пикники, осмотр местности, отдых с использованием автомототранспорта и т.п. Во вторую группу входят купание, отдых с использованием маломерного моторного флота, байдарок и яхт, рыболовство, подводное плавание, виндсерфинг и т.д. Неорганизованный отдых в силу своей стихийности и неравномерности пространственно-временного распределения нагрузок, а также вследствие отсутствия элементарного санитарно-инженерного обустройства оказывает более сильное влияние на качество воды, чем организованный.

1.6.6 *Переработка берегов, строительные и дночерпательные работы*

Важными факторами негативного влияния на качество воды и экологическое состояние водных объектов при переработке берегов и дночерпательных работах являются (***Примеры 11*** и ***12***):

- обрушение массивов грунта вместе почвенными частицами и с сорбированными на них загрязнениями;
- повреждение находящихся вблизи берега объектов в результате обрушений, что является причиной попадания в воду различных загрязнений (размыв кладбищ, коммуникаций и др.) (рис. 1.8д);
- увеличение мутности воды с образованием мелководных хорошо прогреваемых участков, богатых органическим веществом;
- ухудшение условий самоочищения вод;
- заиление, зарастание и заболачивание прибрежных участков, что создает дополнительные вторичные источники загрязнения, связанные с разложением в воде погибших организмов и растений;
- дополнительный вынос ЗВ из донных отложений;
- уменьшение прозрачности и ухудшение условий нереста рыб;
- возникновение ряда косвенных условий, способствующих загрязнению, например, образование мелей вынуждает суда совершать дополнительные маневры, форсировать работу двигателей, что приводит к дополнительному загрязнению воды, увеличению рисков возникновения аварийных ситуаций на водном транспорте.

Основные диффузные источники загрязнения:

- места стоянки автоспецтехники, склады строительных материалов, ГСМ;
- участки русла и берега при строительстве мостов, переходов, прокладке трубопроводов;
- берега, подверженные эрозии;
- участки акватории в местах производства дноуглубительных работ (рис. 1.8е), донные отложения.

Основные ЗВ: взвешенные частицы и сорбированные на них загрязнения.

Пример 11

Основная опасность **дночерпательных работ** состоит в образовании облака растворенных и взвешенных ЗВ, особенно при вскрышных работах, поскольку в среднем 60-80% микроэлементов накапливаются в слое толщиной 10 см. Размеры загрязненного облака в значительной степени определяются толщиной слоя илистых отложений и концентрацией элементов в них, а также скоростью ветра и внутриводоемных течений в районе работ. Определенное влияние оказывает термическая стратификация.

Исследования на **Иваньковском водохранилище** показали, что в штилевых условиях диаметр пятна мутности в поверхностном слое сокращался до 10-15 м, что связано с более низкой температурой воды, поднимаемой при дночерпании и ее быстрым погружением вместе со взвесью. В этих условиях максимум концентрации взвешенных частиц всегда наблюдался в придонном слое. В условиях жаркой безветренной погоды избыточная взвесь оседала на расстоянии 150-200 м от земснаряда. При скорости ветра до 4-6 м/с влияние земснаряда прослеживалось на расстоянии до 500 м.

Пример 12

Источник [21]

Общая протяженность береговой линии **Волжских водохранилищ** составляет более 11 тыс. км. На долю берегов, разрушающихся вследствие абразии, по разным оценкам, приходится от 37 до 48% их общей протяженности, то есть от 4 до 5,2 тыс. км. Особенно интенсивно разрушаются берега в нижних бьефах ГЭС, осуществляющих энергетические попуски.

В результате переработки берегов суммарные потери земель по каскаду оценены в диапазоне 35-39 тыс. га, что составляет 2,1% площади земель, затопленных водохранилищами каскада, или 1,8% общей площади их зеркала.

Например, на **Угличском водохранилище** в настоящее время активно идет процесс переработки берегов на ряде участков общей протяженностью порядка 130 км. Фактическое отступление берега здесь уже превысило расчетные значения «конечной стадии» более чем в два раза и продолжает развиваться. В многоводные годы берег на этих участках отступает почти на 1 м. Таким образом, ежегодно в результате переработки берегов в водохранилище обрушается порядка 650 тыс. м^3 грунта.

Контрольные вопросы и задания к главе 1

1. Что такое «диффузное загрязнение» водных объектов?

2. Какие источники загрязнения водных объектов относятся к неточечным (диффузным) источникам? Варианты ответов:

а) смыв ЗВ с водосбора в составе талых снеговых вод;

б) сброс производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод;

в) выпадение из атмосферы ЗВ, аккумулированных осадками;

г) лесосплав.

3. В какие фазы водного режима водные объекты наиболее подвержены загрязнению от диффузных источников и с чем это связано?

4. Сопоставьте между собой различные типы источников загрязнения и характерные особенности поступления от них в водный объект ЗВ:

а) точечные источники	1) поступление ЗВ происходит постоянно;
	2) концентрация ЗВ в стоке постоянна;
б) диффузные источники	3) концентрация ЗВ в стоке непостоянна;
	4) может выступать в качестве источника вторичного загрязнения;
	5) на формирование количества сточных вод не влияют природные факторы;
	6) на формирование количества сточных вод не влияют субъективные факторы;
	7) на величину стока влияет степень асфальтированности территории;
	8) концентрация ЗВ в стоке снижается с повышением уровня экологической культуры населения

5. Приведите пример формирования залпового поступления азотсодержащих веществ в водный объект от диффузного источника.

6. Как происходит «вторичное» загрязнение водного объекта?

7. Какие показатели качества воды репрезентативны для оценки диффузного загрязнения водного объекта? Варианты ответов:

а) температура; б) ХПК; в) сульфаты; г) СПАВ; д) нефтепродукты

8. Диффузный сток формируется в результате:

а) поступления ЗВ от диффузных источников;
б) сброса сточных вод через выпуски промышленных предприятий;
в) аварийного разлива нефтепродуктов при нефтедобыче;
г) эрозии почв.

9. С увеличение уплотненности почвы диффузный сток ТМ ….. . Варианты ответа:

а) увеличивается; б) уменьшается; в) не меняется.

Объясните свое решение.

10. Приведите пример линейного диффузного источника загрязнения.

11. Установите соответствие между источником диффузного загрязнения и ЗВ, поступающим в водный объект от этого источника:

а) навозохранилище	1) взвешенные вещества;
б) грунтовые воды	2) нефтепродукты;
в) судоходство	3) пестициды
г) отвалы горных пород	4) органические соединения, оцениваемые по показателю ХПК
д) городская территория	5) тяжелые металлы

12. Почему сложно количественно оценить величину диффузного загрязнения?

13. Приведите примеры влияния субъективных факторов на формирование диффузного загрязнения.

14. Почему точечные источники выбросов ЗВ в атмосферу промышленных предприятий можно считать также диффузным источником загрязнения водных объектов?

II МОНИТОРИНГ ДИФФУЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

2.1 Использование действующей системы мониторинга и средств наблюдений за диффузными источниками

Государственный мониторинг поверхностных вод суши является составной частью мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды. Порядок создания и ведения государственного мониторинга, распределение функций и обязанностей ведомств определены рядом нормативных правовых актов, включая документы государственного (ГОСТы) и ведомственного (руководящие документы, руководства, инструкции и т. д.) уровня, определяющих принципы и порядок организации и функционирования системы мониторинга [22-25].

Система государственного мониторинга водных объектов функционирует в следующих целях [26]:

- своевременное выявление и прогнозирование негативного воздействия вод, а также развития негативных процессов, влияющих на качество воды в водных объектах и их состояние, разработка и реализация мер по предотвращению негативных последствий этих процессов;
- информационное обеспечение управления в области использования и охраны водных объектов, в том числе в целях государственного надзора;
- оценка эффективности осуществляемых мероприятий по охране водных объектов.

К числу достоинств государственной наблюдательной сети Росгидромета относятся систематичность и достаточная продолжительность режимных наблюдений, что позволяет иметь «длинные» ряды данных в пунктах наблюдения и выявлять многолетние тенденции изменения уровня загрязненности воды, а также приоритетные по уровню загрязненности водные объекты и их участки и прослеживать тенденции изменения качества воды. Это единственная система, которая длительное время (более 50 лет) предоставляет потребителям информационные материалы, обобщенные и систематизированные как по территориям субъектов федерации и УГМС, так и по бассейнам крупных рек и стране в целом.

Однако слабым местом действующей системы государственного гидрохимического и гидробиологического мониторинга является недостаточная информационная поддержка при выявлении и принятии

оперативных решений по снижению негативного воздействия диффузных источников и создания необходимых условий регулирования качества природных вод, связанного с таким воздействием. Другими словами, перечисленные выше цели реализуются не полностью (***Пример 13***).

> ***Пример 13***
>
> Из действующих на настоящий момент в бассейне р. Волги 318 постов гидрохимических наблюдений на водотоках, входящих в систему Росгидромета, подавляющее большинство относится к 3 (72%) и 4 (26%) категориям, с частотой наблюдений в лучшем случае 1-2 раза в месяц [24]. Кроме того, около 40% от общего количества постов не обеспечены в полной мере надежными гидрометрическими наблюдениями, поэтому точные оценки объемов поступления ЗВ для таких постов сильно затруднены.
>
> Пункты мониторинга в основном размещаются в городах и крупных поселках с активным сбросом сточных вод или в местах организованного их отведения отдельными крупными промышленными предприятиями, ТЭС, АЭС.

Однако информация, поступающая с государственной и региональных сетей инструментальных наблюдений за качеством водных объектов и состоянием других элементов окружающей среды, а также результаты визуальных инспекционных обследований, выполняемых региональными экологическими ведомствами, надзорными и контролирующими органами в пределах водосборных территорий, могут быть использованы для первичного выявления воздействия рассредоточенных по водосбору источников загрязнения на качество воды и/или выделения «подозрительных» участков водного объекта.

Такие «подозрительные» участки на водосборах водных объектов могут быть выявлены с помощью следующих средств наблюдений (рис. 2.1):

- на основе *органолептических признаков* ухудшения качества воды – визуальных (см. п. 1.2) и при появлении специфических запахов воды, прежде всего навозного, нефтяного, химического (рис. 2.1а,б);
- по результатам *измерения концентраций* ЗВ в водном объекте (см. п. 1.2) и их сопоставлении с количественными и качественными характеристиками сточных вод, поступающих от точечных источников;
- по *данным аэрофотосъемки* с привлечением беспилотных летательных аппаратов;

- по *данным дистанционного зондирования* и последующего дешифрирования космических снимков;

- по *результатам математического моделирования* химического состава и качества воды в речном бассейне;

- по *данным государственной статистики* о видах и интенсивности хозяйственной деятельности в бассейне водного объекта.

Одним из перспективных видов получения визуальной дистанционной информации о наличии признаков диффузного загрязнения может служить использование аэрофотосъемки с привлечением беспилотных летательных аппаратов, позволяющих получать более высокое разрешение (рис. 2.1в). Одним из дополнительных преимуществ является высокая автономность использования, позволяющая проводить наблюдения необходимой частоты и на любую интересующую дату. Данный подход может эффективно применяться в практике оперативного мониторинга водосборов как государственными надзорными органами и федеральными агентствами, так и в случае контроля отдельными предприятиями и организациями интересующей их территории.

Данные дистанционного зондирования, включая как специализированные продукты, так и общедоступные интернет-ресурсы, а также интернет-порталы отдельных ведомств могут быть полезными при проведении мониторинга хозяйственного использования земель на обширных территориях. На снимках хорошо видны такие объекты, как дороги, застроенные территории, реки и озера, и могут быть идентифицированы, отображены и использованы хотя бы на подготовительном этапе к получению более подробных данных общие типы землепользования (например городское, сельское хозяйство или лес) (рис. 2.1г). Дистанционные методы позволяют определить те показатели, которые контролируются визуально, например, тип и густоту растительности на исследуемой территории или даже вид сельскохозяйственных культур.

Поскольку ни одна программа мониторинга не может измерить все показатели на всех интересующих участках и так часто, как хотелось бы, для оценки воздействия диффузного загрязнения, особенно для больших бассейнов, необходимо использовать возможности математического моделирования и ГИС-технологий.

Ручей в зоне воздействия Среднеуральского металлургического завода (бассейн р. Камы, лето 2018 г.). Анализ проб почвы показал, что в верхнем ее слое в результате выбросов в атмосферу предприятием накоплено значительное количество ТМ и серы. Наблюдается **сильное угнетение растительности** и отсутствие трав и кустарников.

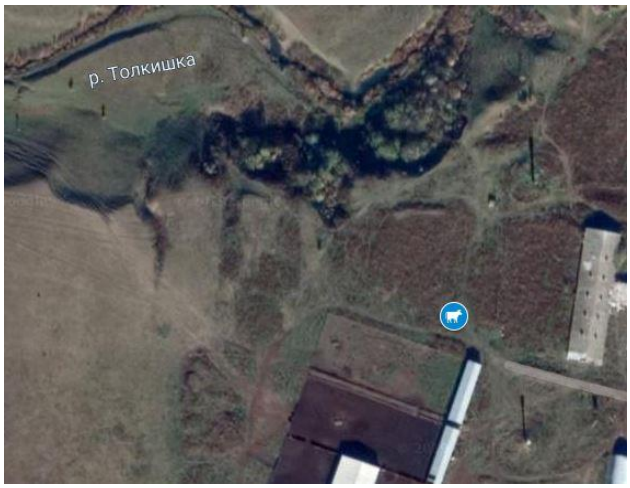
а

Участок водосбора р. Чаченки (бассейн р. Москвы, весна 2013 г.). Наблюдается поток воды с **высоким содержанием взвешенных веществ и нефтепродуктов** на участке строительства автодороги в обход г. Одинцово.

б

Участок поймы малой реки – притока р. Грязевы (бассейн р. Истры в районе г. Дедовска, весна 2015 г.) с хорошо видимыми признаками диффузного загрязнения - нарушенным почвенным покровом и следами спецавтотехники.

в



Река Толкишка (бассейн Куйбышевского водохранилища) и в непосредственной близости от нее животноводческое предприятие с неудовлетворительным состоянием навозохранилищ и нарушением агротехнологии утилизации побочных продуктов производства.

г

Рис. 2.1. Примеры идентификации диффузного загрязнения водных объектов:
а, б – при визуальном обследовании; в – в ходе аэрофотосъемки с использованием беспилотного летательного аппарата; г – на основе данных дешифрирования космических снимков

Математические модели необходимы для прогнозирования качества воды и выявления тенденций его возможных изменений с течением времени. Моделирование в целом позволяет проводить сценарные расчеты и отвечать на вопросы типа «Что будет, если…», принимая во внимание возможные сценарии изменения климата, характера землепользования, интенсивности антропогенной нагрузки или внедрения водоохранных мероприятий и практик. Таким образом, моделирование помогает прогнозировать будущий отклик системы на внешние воздействия, слишком многофакторные или трудоемкие для эффективного мониторинга. Моделирование дает средства для сбора, представления и проверки текущего состояния знаний и указания направлений будущих исследований.

Однако необходимо четко осознавать, что моделирование – технически сложный процесс, требующий аккуратной обработки очень большого массива данных, а также проведения подготовительных работ весьма значительного объема. Применение моделей в условиях недостатка исходных данных и/или их низкого качества затрудняет калибровку моделей и способствует возникновению неопределенности в отношении результатов модели, тем самым ставит под угрозу полезность моделирования для принятия управленческих решений. Успешное математическое моделирование возможно только в том случае, если оно должным образом согласовано с мониторингом, со сбором, обработкой данных и другими методами оценки характеристик всего бассейна.

На рис. 2.2 приведены результаты математического моделирования для описания пространственно-временных закономерностей формирования стока ТМ (на примере меди) для бассейна Нижнекамского водохранилища, который включает почти полностью территорию республики Башкортостан, а также частично участки территорий Татарстана, Удмуртии, Челябинской и других областей. В выборе объекта исследований основную роль сыграли подробные данные режимного гидрохимического мониторинга в бассейне р. Белой, а также данные о пространственном загрязнении почв тяжелыми металлами, обобщенные в виде карты в составе атласа региона.

По результатам моделирования выявлен участок водосбора (выделен на рис. 2.2в красным овалом), не охваченный гидрохимическими наблюдениями, со значительным уровнем загрязнения речных вод. Среднемноголетние значения концентрации

меди на этом участке превышают аналогичные по бассейну в 5-6 раз. Сопоставление карт пространственного распределения содержания меди в речной сети и содержания металла в почвах указывает на тесную связь этих геохимических явлений.

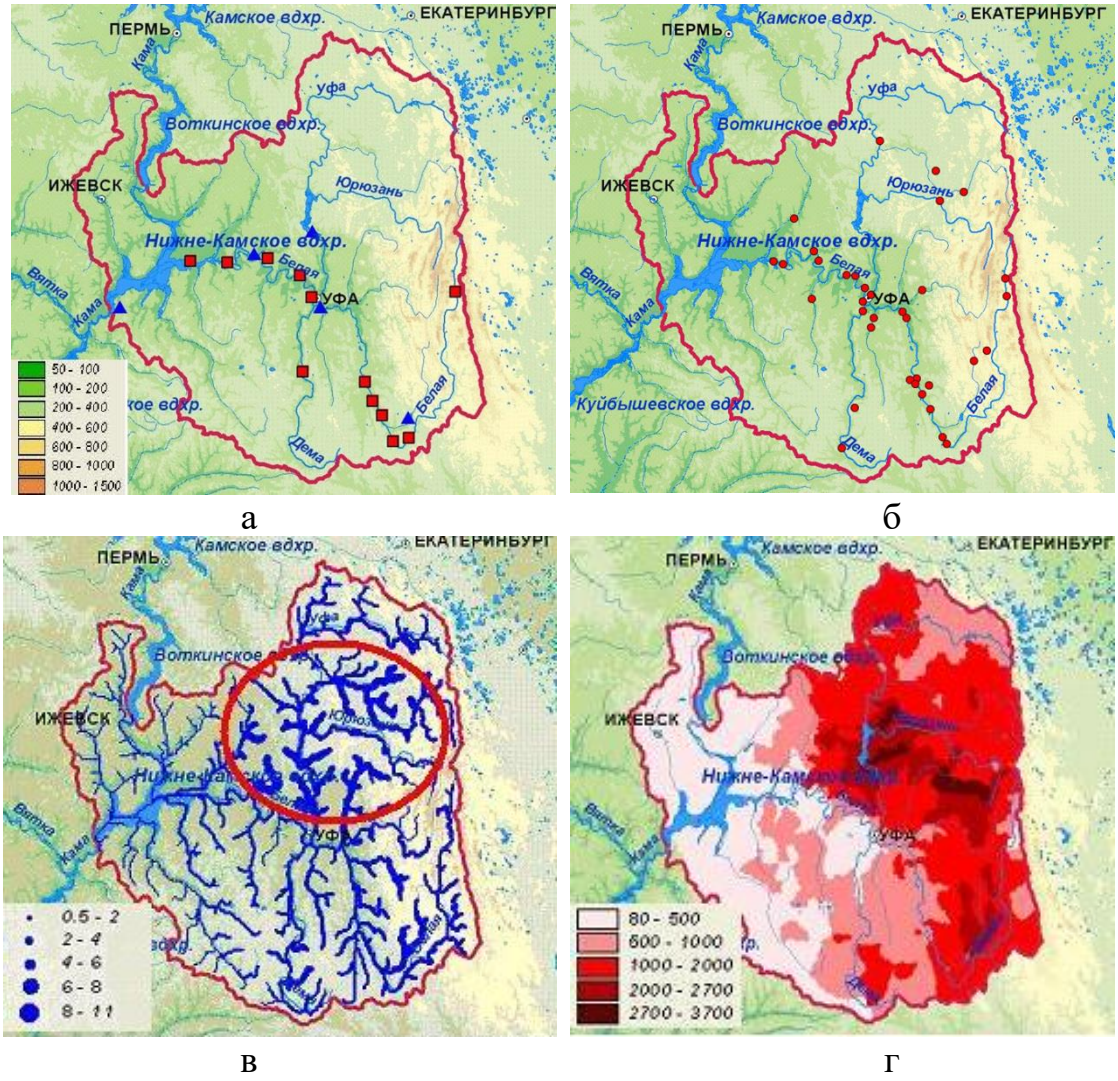
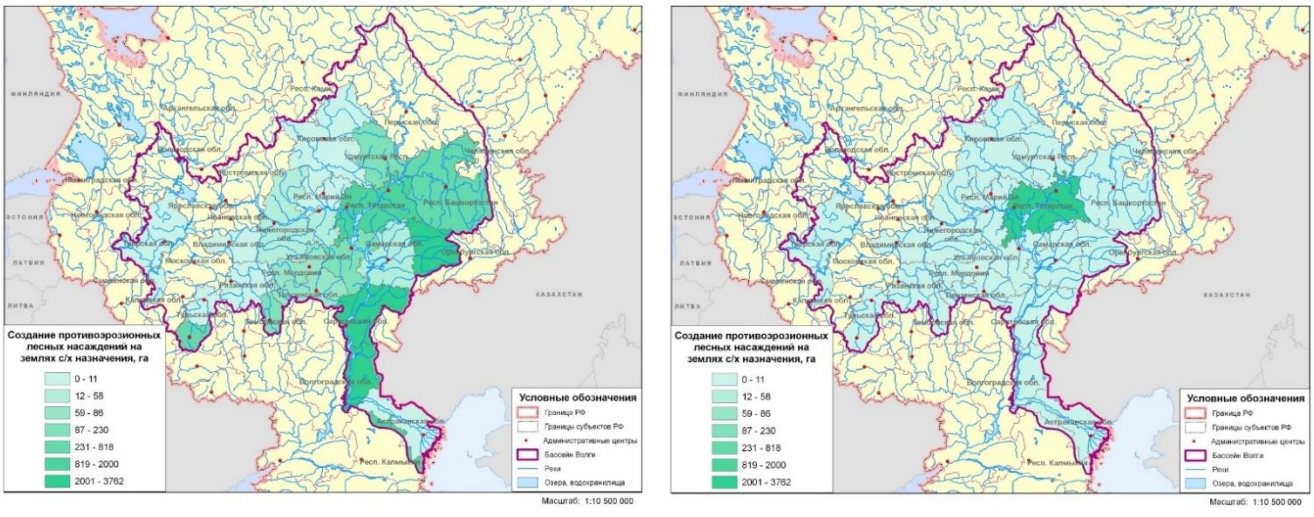


Рис. 2.2. Моделирование содержания меди в речной системе бассейна Нижнекамского водохранилища: а – расположение пунктов наблюдения за стоком (треугольники) и сбросами сточных вод (квадраты); б – посты гидрохимического мониторинга Росгидромета; в – распределение рассчитанных среднемноголетних концентраций меди в речной сети, мкг/л; г – годовой модуль стока меди, г/(год·км^2) [27]

Официальная государственная статистика может дать определенное представление о тенденциях в качестве воды, экологическом состоянии водных объектов, применяемых технологиях, объеме внесения удобрений, видах землепользования, категориях земельных участков и проч. Часть информационных материалов, например ежегодники загрязнения почв, радиационной обстановки на территории РФ, ежегодники мониторинга пестицидов в

отдельных природных средах, посвящена отдельным ЗВ или средам. Данные по отдельным участкам и населенным пунктам содержатся в обзорах загрязнения окружающей среды, ежегодно выпускаемых региональными управлениями Росгидромета, отчетах профильных министерств и ведомств областного уровня (Росприроднадзор, Минсельхоз России, Росводресурсы и др.). Однако в большинстве случаев информация обобщается на общегосударственном или, в лучшем случае, на региональном уровнях (уровень субъектов РФ) и не обладает достаточной степенью подробности либо ее вовсе бывает недостаточно. Такая информация может быть полезна для предварительной оценки состояния предполагаемого к исследованию водного объекта, приоритетных ЗВ как в нем самом, так и на водосборной территории. Дополнительная информация о конкретных бассейнах рек может быть частично получена из специализированных исследований, выполненных в рамках разработки нормативов допустимого воздействия (НДВ) и СКИОВО.

Для примера на рис. 2.3-2.6 приведены данные государственной статистики, показывающие пространственно-временную динамику природно-хозяйственных показателей состояния водосборов. Эти данные одновременно характеризуют и диффузное загрязнение, позволяя с достаточной степенью надежности судить об изменении количества ЗВ от диффузных источников.



1995 г. **2015 г.**

Рис. 2.3. Динамика создания противоэрозионных лесных насаждений на землях сельскохозяйственного назначения в бассейне р. Волги, га (по ГИС «Риск диффузного загрязнения Волги»)

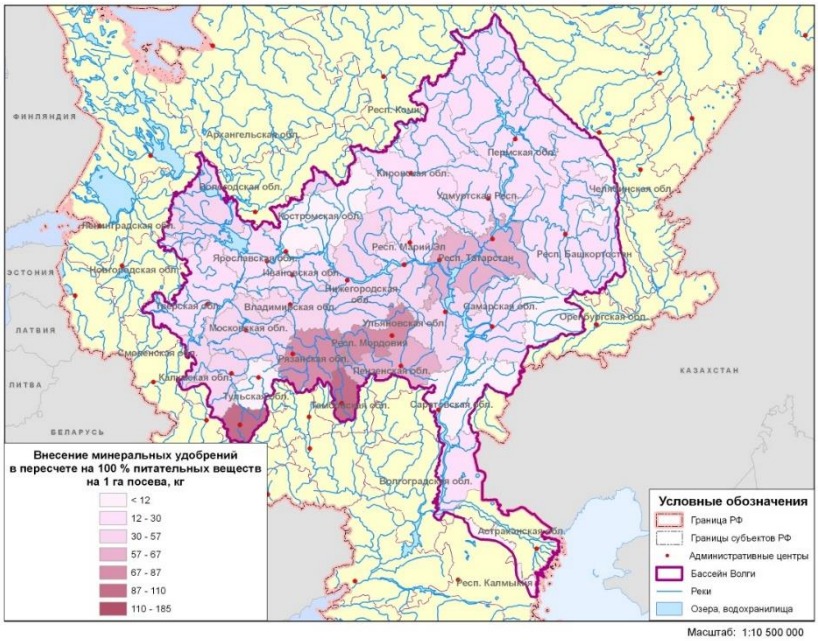


Рис. 2.4. Внесение минеральных удобрений на единицу посевной площади в бассейне р. Волги в 2017 г., кг/га

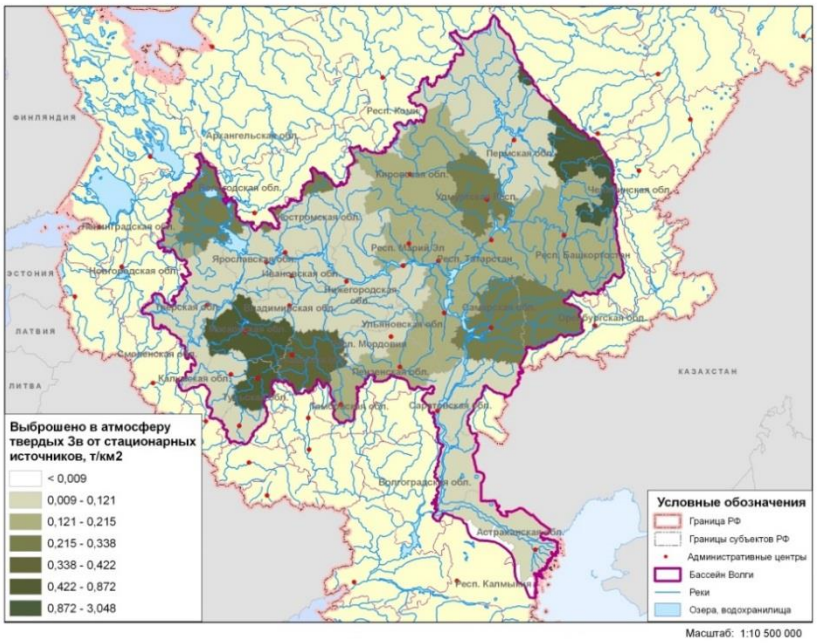


Рис. 2.5. Выброшено в атмосферу твердых ЗВ от стационарных источников в бассейне р. Волги (в среднем за период 2015-2017 гг.)

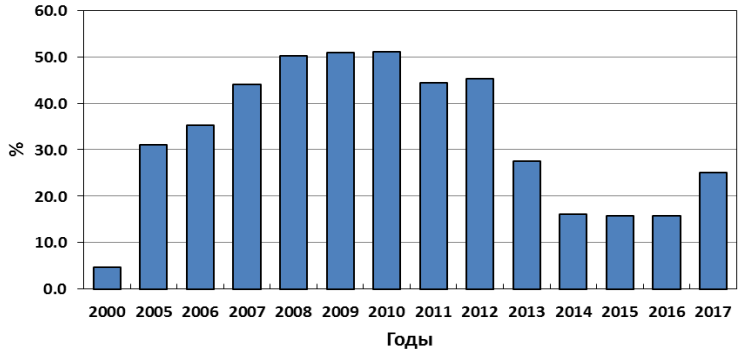


Рис. 2.6. Доля переработанных отходов на предприятиях промышленной переработки в общем количестве образующихся отходов в г. Москве, %

Имеющиеся результаты обследования водных объектов, а также карты землепользования, аэрофотоснимки, спутниковая информация дают возможность быстро осуществить обзор возможных нагрузок в пределах водосборов. Оценивая сложившееся экологическое состояние водного объекта, а также выполняя экспертную оценку возможных рисков (в том числе на основе моделирования), стороны, ответственные за мониторинг, могут решить, какие действия по мониторингу имеют наивысший приоритет. Решение может быть принято с использованием концепции «ожидаемого ущерба», то есть определения того, к каким негативным последствиям (экологическим, социальным, экономическим) может привести недостаток информации из-за отсутствия мониторинга (включая последствия неоптимальных решений).

При наличии признаков диффузного загрязнения на конкретном водном объекте целесообразно найти более обоснованные подтверждения, которые можно получить только инструментальными методами и лабораторным анализом проб воды (рис. 2.7). Отбор проб при этом следует проводить по учащенной временной сетке в периоды года, когда источники диффузного загрязнения проявляют себя наиболее активно (как правило, это многоводные фазы водного режима) и снова переходить на обычную частоту наблюдений, когда их влияние прекращается. Это повысит «гибкость» существующей системы наблюдений при относительно небольших дополнительных затратах.

а б

Рис. 2.7. Гидрохимические исследования на водных объектах: а – отбор проб воды; б – лабораторный анализ в полевых условиях

2.2 Основные принципы организации мониторинга диффузного загрязнения

К основным задачам мониторинга диффузного загрязнения можно отнести следующие:

- выявление и количественная оценка вклада источников диффузного загрязнения в общее загрязнение природных вод;
- анализ механизмов и путей формирования диффузного загрязнения;
- статистически достоверная оценка эффективности внедряемых технологий, экологически ориентированных практик землепользования и мероприятий по предотвращению и/или снижению диффузного загрязнения водных объектов.

В общем случае мониторинг должен служить источником объективных данных об объемах и характере диффузного загрязнения в целях информационной поддержки водоохраной политики, например путем идентификации мест, типов хозяйственной деятельности и ЗВ, оказывающих наиболее негативное влияние, в целях расстановки приоритетов при выделении ресурсов на меры по снижению поступления ЗВ. Кроме того, такой мониторинг должен обеспечивать необходимыми исходными данными методики расчета поступающих загрязнений.

В целях получения более точных количественных оценок диффузного загрязнения требуется разработка отдельного подхода, основанного на следующих базовых принципах.

Принцип 1. Учет гидрометеорологического режима.

Основные потоки ЗВ от неточечных источников формируются при выпадении осадков и таянии снега. Эта особенность определяет характер поступления ЗВ в водные объекты (периодичность, интенсивность, продолжительность). Поэтому контроль качества воды для выявления диффузного загрязнения и его количественной оценки должен быть ориентирован прежде всего на многоводные фазы водного режима (весеннее половодье и дождевые паводки).

Наблюдениями установлено, что часто наибольшая нагрузка ЗВ от неточечных источников характерна для подъема половодья или дождевого паводка, т.е. еще до того, как водность рек достигает своих максимальных значений (рис. 2.8). Более того, многолетний опыт

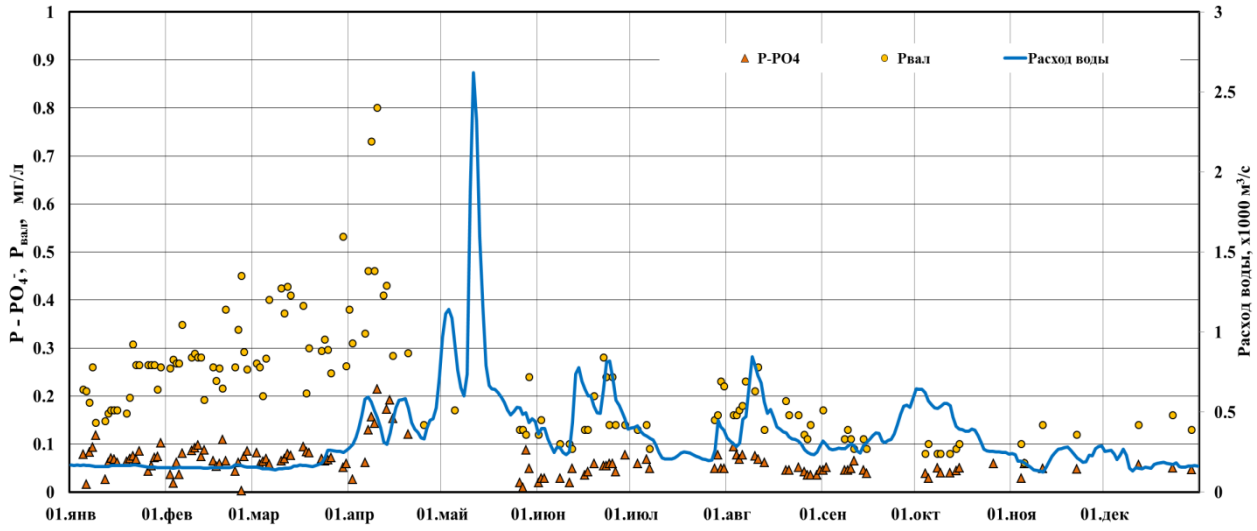
исследований и наблюдений в бассейнах рек Москвы и Волги показывает, что именно на подъеме половодья и паводков чаще всего фиксируются специфические запахи загрязненных вод – нефтяной, навозный (как индикаторы поверхностного смыва) и сточный (часто как индикатор излива стоков из общесплавной системы канализации).

Принцип 2. Учет хозяйственной деятельности.

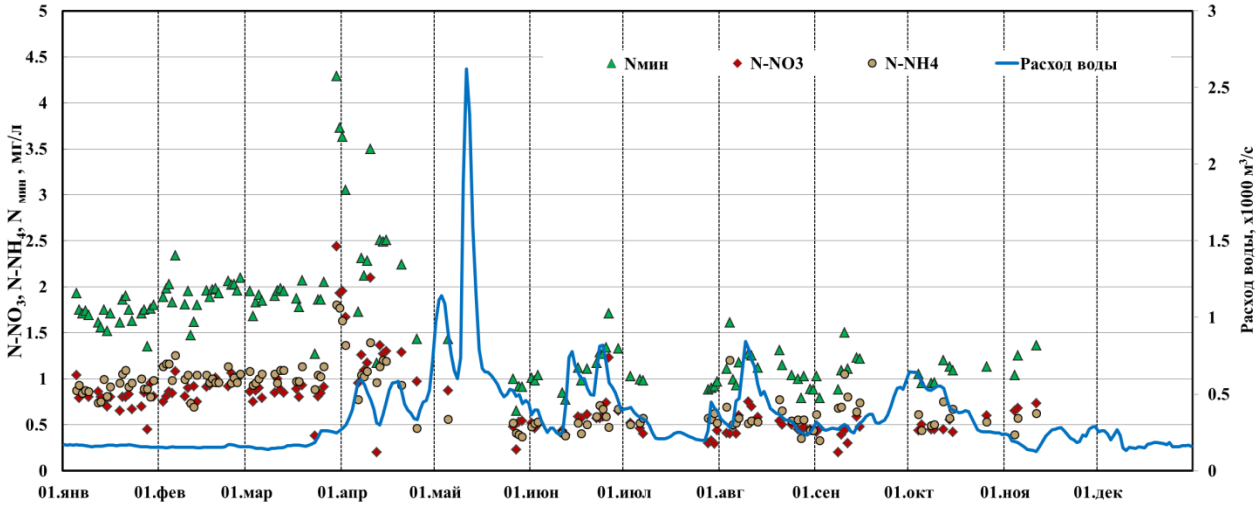
Хозяйственная деятельность – ведущий фактор диффузного загрязнения, которое сильно меняется в зависимости от местоположения (распределения) источников на водосборной территории, режима их функционирования и времени года.

Для установления связи между источниками загрязнения и наблюдаемым качеством воды в пункте контроля и/или экологическим состоянием водного объекта необходимо отслеживать виды деятельности на водосборной территории, которые генерируют ЗВ, а также ряд дополнительных параметров. Качество воды представляет собой итоговый эффект воздействия в сложившихся физико-географических условиях, при этом вид хозяйственной деятельности и то, как она осуществляется, определяют источник воздействия, а физико-географические условия – передаточный механизм от источника к водному объекту, т.е. интересующему нас (но не единственному) объекту воздействия.

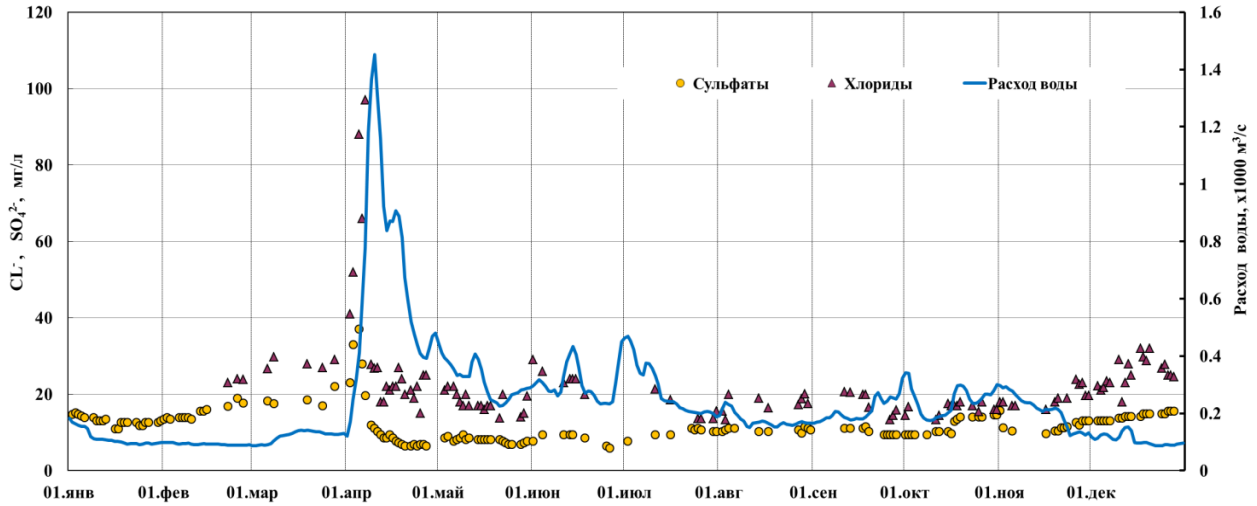
Таким образом, чтобы полностью понять механизмы и причины загрязнения, нужно измерять как зависимые переменные (показатели качества воды), так и наблюдать за независимыми переменными (хозяйственной деятельностью) и физико-географическими условиями, которые также могут изменяться. Поскольку влияние оказывают не столько типы хозяйственной деятельности в пределах водосборной территории, сколько применяемые практики землепользования, технологические процессы и внедряемые природоохранные мероприятия, сроки и полнота их выполнения, то на практике такого рода мониторинг не должен отождествляться с учетом одних только видов землепользования или статической мозаичной картины типов земель, почвенного покрова и растительности, которую можно увидеть, например, на спутниковом изображении. Важно учитывать динамические процессы, отвечающие за пространственно-временную динамику появления ЗВ.



а



б



в

Рис. 2.8. Внутригодовое изменение содержания ЗВ в Иваньковском водохранилище у д. Плоски в зависимости от притока воды: а – фосфора минерального ($P\text{-}PO_4$) и валового ($Р_{вал}$) (1987 г.); б – азота минерального ($N_{мин}$), аммонийного ($N\text{-}NH_4$), нитратного ($N\text{-}NO_3$) (1987 г.); в – сульфатов (SO_4^{2-}) и хлоридов (CL^-) (1984 г.) [28]

Примеры ЗВ и общие соответствующие им хозяйственные мероприятия, практики, параметры и процессы, подлежащие мониторингу, показаны в ***Примере 14***.

Пример 14 **Источник [29]**

Тип загрязняющего вещества (источника)	Мониторируемые объекты, процессы, факторы и параметры
Взвешенные вещества (почвенная эрозия)	Обработка почв, посадка растений и сбор урожая, практики, предотвращающие эрозию почв, атмосферные осадки.
Взвешенные вещества (эрозия берегов)	Расходы воды, морфометрические характеристики речного русла, увлажнение склонов, прибрежная растительность, атмосферные осадки.
Фосфор	Утилизация навоза, поголовье скота, применение удобрений, почвенные пробы
Азот	Внесение навоза и удобрений, культивирование бобовых культур, движение грунтовых вод.
Пестициды	Интенсивность и сроки внесения пестицидов, атмосферные осадки.
Патогенные микроорганизмы	Поголовье скота, выпас животных, состояние прибрежной территории, огораживание пастбищ, утилизация навоза. Количество домашних, диких животных и водоплавающей птицы, состояние и обслуживание септиков и канализационных сетей, незаконные сбросы сточных вод и подключения к канализационным коллекторам.
Растворы солей	Время и количество внесенных антигололедных реагентов, объемы поставок, месторасположение и километраж дорог, подвергаемых обработке реагентами, возвратные воды от ирригации.
Тяжелые металлы	Движение транспортных средств, дорожная инфраструктура, мытье и чистка улиц, наличие и состояние дорожной ливневой канализации.
Сток с городских территорий	Площадь трудно проницаемых покрытий, атмосферные осадки, состояние ливневой канализации.

Мониторинг хозяйственной деятельности позволяет максимально объективно интерпретировать изменения качества воды в водных объектах, состояние и направленность развития их экосистем, действенность тех или иных природоохранных мероприятий, эффект практик землепользования и экологически ориентированных производственных процессов.

Этот вид мониторинга применяется для:

- выявления факторов антропогенного воздействия и видов землепользования, практикуемых в пределах водосборной территории;

- обнаружения субъектов хозяйственной деятельности, ведущих ее в нарушение водоохранного и санитарно-экологического законодательства, а также технологий и внутриведомственных стандартов;

- определения полноты и масштабов выполнения природоохранных мероприятий, а также оценке их эффективности.

Для выявления факторов диффузного загрязнения требуется информация как о пространственной, так и временной изменчивости хозяйственной деятельности.

Мониторинг должен охватывать всю территорию, в пределах которой формируются водные ресурсы и качество воды, контролируемые в конкретной точке отбора проб. Отдельным частям водосбора может быть уделено более пристальное внимание, чем другим, в зависимости от целей исследования и условий формирования качества воды.

Основной принцип, лежащий в основе выбора частоты наблюдений, заключается в том, чтобы временной интервал был достаточным для объяснения происходящих изменений качества воды. Частота наблюдений за динамическими параметрами должна устанавливаться в зависимости от типа и величины влияния параметра на измеренные показатели качества воды.

При выборе частоты наблюдений рекомендуется ориентироваться на многоуровневый подход к мониторингу хозяйственной деятельности.

Уровень 1. Общая характеристика: первоначальный «снимок» структуры землепользования, почвенно-растительного покрова и др. с упором на относительно статичные параметры (по крайней мере по отношению к периоду проведения мониторинга), такие как водные объекты, шоссе, непроницаемые поверхности и весь широкий спектр вариантов использования городских, сельскохозяйственных и лесных земель.

Уровень 2. Ежегодное обследование для ежегодно изменяющихся характеристик, таких как тип выращиваемых сельскохозяйственных культур.

Уровень 3. Еженедельные наблюдения или записи в журнале для определения конкретных даты/времени критических действий, таких как применение навоза или гербицидов, обработка почвы, строительство и уборка улиц.

Уровень 4. Сбор данных о нормах и характеристиках деятельности в натуральных показателях (например, нормах применения питательных веществ или гербицидов, количестве животных на пастбище, площади вырубок леса, интенсивности движения транспорта).

В целях эффективного сопоставления данных программа мониторинга должна учитывать пути загрязнения и время отклика качества воды на происходящие воздействия на водосборную территорию.

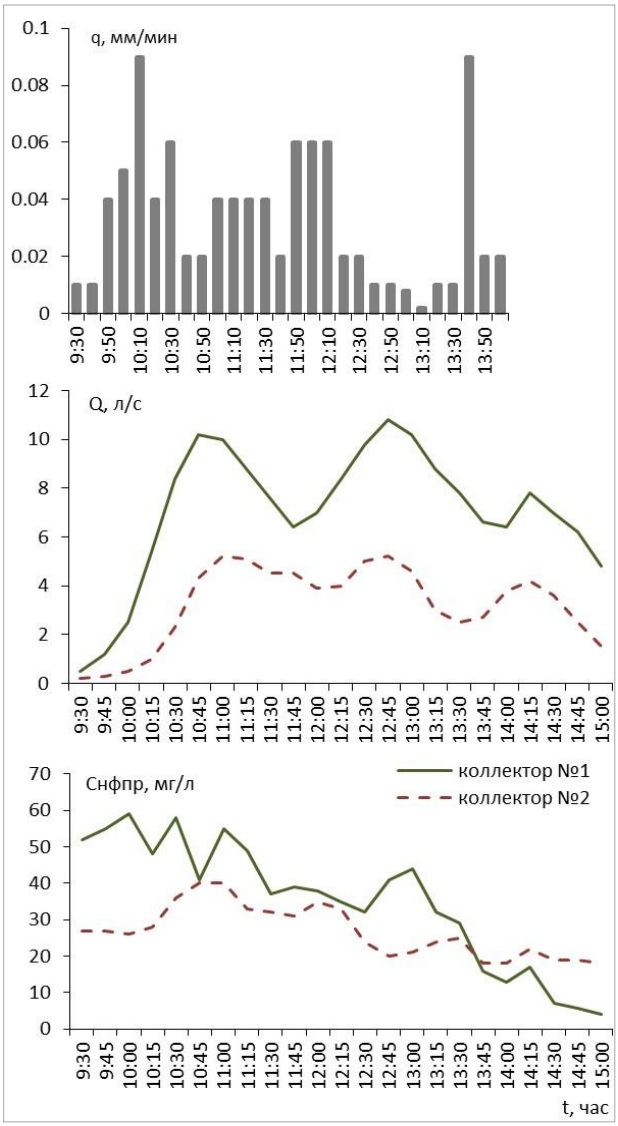
Принцип 3. Репрезентативность.

Возможности систем мониторинга диффузного загрязнения водных объектов зависят от пространственной плотности точек наблюдений, периодичности отбора проб воды применительно к пространственно-временным изменениям на исследуемой территории, а также от погрешностей, связанных с отбором проб и проведением измерений.

В общем случае частота наблюдений должна быть выше динамики загрязнений в водном объекте, определяемой изменчивостью последнего. Если, например, проект мониторинга нацелен на то, чтобы получить объективную оценку выноса ЗВ вместе с дождевым стоком с городской территории, промышленной площадки или отдельных их частей, то может потребоваться измерение интенсивности жидких осадков, расходов воды и проведение отбора проб воды с частотой в зависимости от фазы водного режима: 1 раз в 10-30 минут – в течение дождевого паводка и не реже 1 раза в сутки – для периода снеготаяния (рис. 2.9).

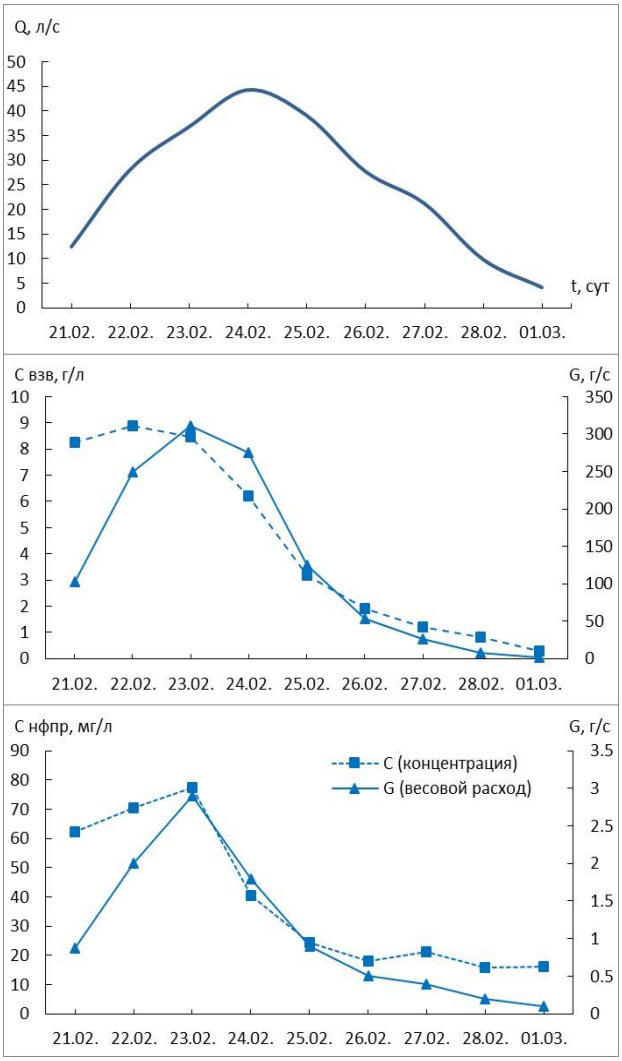
Для отдельных речных водосборов, в замыкающих створах которых проводятся наблюдения, частота отбора проб должна устанавливаться с учетом времени добегания воды с водосборной территории.

Сочетание дифференцированного подхода к выбору частоты наблюдений в зависимости от сезона года, водосборной площади и типа территории с одновременным измерением гидрометеорологических параметров позволяют не только зафиксировать факт диффузного загрязнения, но и получить более точную оценку объемов поступления ЗВ.



Интенсивность осадков, экспериментальные гидрографы и полютографы (графики изменения концентрации нефтепродуктов) ливневых коллекторов №№ 1, 2 промплощадки ГРЭС (площадь 38,5 га) г. Конаково (бассейн Иваньковского водохранилища), 25.09.1990 г. Отбор проб производился в течение всего дождя и некоторое время после его прекращения с частотой 1 раз в 15 минут.

а



Экспериментальные наблюдения расходов воды (Q), концентраций взвешенных веществ (Свзв) и нефтепродуктов (Снфпр) на ливнеспуске в г. Тверь, 1990 г. Отбор проб производился в период оттепели в конце зимы с частотой 1 раз в сутки. Наглядная иллюстрация волны диффузного стока (G) с участка городской территории площадью несколько сотен га, дренируемой ливневым коллектором.

б

Рис. 2.9. Результаты исследования формирования диффузного загрязнения на городских территориях: а – г. Конаково; б – г. Тверь

Принцип 4. Сфокусированность на верхних звеньях гидрографической сети.

При организации изучения факторов диффузного загрязнения мониторингу малых водосборов должно быть уделено особое внимание, поскольку они являются наилучшими индикаторами антропогенного воздействия. Ухудшение экологического состояния малых рек представляет собой один из основных предикторов развития негативных процессов большего масштаба, которые можно выявить и предотвратить на ранних стадиях их развития.

В случае природных водотоков предпочтение желательно отдавать ручьям (водосборная территория до 10 км^2) и малым рекам (с водосборной территорией условно от 10 до 2 тыс. км^2). Указанный пространственный масштаб предполагает наиболее эффективное использование трудозатрат и финансовых средств с точки зрения реализации проекта и контроля его выполнения на областном и/или муниципальном уровне.

Небольшие пространственные масштабы лучше поддаются производственному и инспекционному контролю, поэтому результаты анализа системы «воздействие – отклик» будут более обоснованными.

2.3 Стратегия мониторинга диффузного загрязнения

Данные мониторинга являются основой управления диффузным загрязнением, направленного на предотвращение или снижение его воздействия там, где это технически достижимо и экономически оправдано. Наряду с фискальными мерами управление подразумевает одновременное внедрение водоохранных мероприятий и экологически ориентированных практик землепользования.

Программа мониторинга должна иметь *конкретные цели*. Среди них, как минимум, должны присутствовать следующие:

а) выявление приоритетных ЗВ (показателей качества воды), поступающих с различных видов хозяйственно освоенных территорий (сельскохозяйственных угодий, городской застройки, промышленных и строительных площадок и др.);

б) выявление условий и оценка степени влияния отдельных видов хозяйственной деятельности на качество воды и экологическое состояние дренирующих исследуемую территорию водных объектов;

в) определение применимости и эффективности водоохранных мероприятий, экологически ориентированных практик землепользования и управленческих решений по снижению диффузного загрязнения (для каждого вида хозяйственной деятельности и конкретного водного объекта).

Анализ *качества воды* непосредственно в речной сети должен сопровождаться *анализом пространственной информации* как общего (тип использования территорий, густота речной сети, растительность), так и частного (способы внесения химикатов, их вид и др.) характера. Более того, без надежных и тщательно собранных данных «в поле» выявить источники диффузного загрязнения и оценить их влияние практически невозможно.

Установление *однозначного соответствия* между внедрением экологически ориентированных практик ведения хозяйственной деятельности на водосборе и последующими изменениями качества воды в водном объекте представляет собой непростую задачу. Чтобы преодолеть трудности при организации мониторинга и избежать ошибок при интерпретации результатов, целесообразно придерживаться следующих рекомендаций:

- ✓ Подробное и аккуратное документирование проблемы качества воды, включая описание причин его ухудшения, приоритетных ЗВ, территории источника загрязнения и др. Это позволит сформулировать набор реалистичных и количественно оцениваемых целей в области качества воды и водоохранных практик и облегчит оценку результативности проекта в целом.
- ✓ Тщательный анализ изменений в использовании территорий и применяемых технологий обработки земли в течение всего времени проведения эксперимента с одновременным мониторингом качества воды достаточной детальности с целью убедиться в том, что изменения качества воды произошли именно благодаря направленному воздействию на водосборную территорию.
- ✓ Репрезентативные наблюдения за гидрологическим режимом водного объекта. В п. 2.2 отмечено, что диффузное загрязнение в явном виде проявляется в многоводные периоды года (весеннее половодье, дождевые и снего-дождевые паводки), что особенно характерно для относительно небольших водосборов ручьев и малых рек. Поэтому необходима организация наблюдений за расходами воды в реке, температурой воздуха, количеством выпавших

осадков в период дождевого паводка и за интенсивностью их выпадения.

✓ Продуманный проект (схема) экспериментальных работ (см. п. 2.4), например, на основе проведения наблюдений на «парных» водосборах, на соподчиненных водосборах («выше» и «ниже» по течению) или на нескольких независимых водосборах в целях получения статистически достоверной информации и выводов. При этом наблюдения проводятся до начала внедрения правильных практик землепользования, в период их применения и после того, как такие практики и мероприятия будут проведены.

✓ Четкое соответствие наблюдаемых показателей качества воды в водном объекте тем ЗВ, на уменьшение поступления которых нацелены практические мероприятия на водосборной территории этого объекта. Важно также отслеживать и другие, на первый взгляд, незначительные факторы, такие как изменения в численности животных (для пастбищ) или изменение площади водонепроницаемых покрытий (например для урбанизированных территорий), включая уже упомянутые выше климатические и иные факторы.

✓ Внедрение подходящих водоохранных мероприятий, мониторинг полноты их выполнения и проверка на предмет соответствия первоначальному плану. Мероприятия должны выбираться исходя из наиболее существенных для качества воды ЗВ и применяться в первую очередь на наиболее критических с точки зрения формирования загрязнений участках речного водосбора. Предпочтительно, чтобы для одного и того же вида негативного антропогенного воздействия или ЗВ использовались сразу несколько однонаправленных мероприятий, поскольку их совокупное воздействие будет более эффективным, а улучшение качества воды – достижимым в более короткие сроки. В данном случае, однако, сокращение временно́го периода нельзя рассматривать как самоцель или приоритет.

✓ Важным фактором успешного проекта мониторинга является предоставление информации и реализация образовательных программ для землепользователей, представителей хозяйствующих субъектов, общественности как на предварительном этапе, так и в период выполнения работ. Это помогает повысить осознанность и вовлеченность всех заинтересованных лиц, участвующих в проектах.

2.4 Выбор проекта (схемы) мониторинга диффузного загрязнения

Для оценки эффективности выполняемых на водосборе водоохранных мероприятий, выявления причинно-следственных связей между изменениями в землепользовании и качеством воды в водном объекте необходимо ориентироваться на несколько принципиальных подходов к организации наблюдений (рис. 2.10).

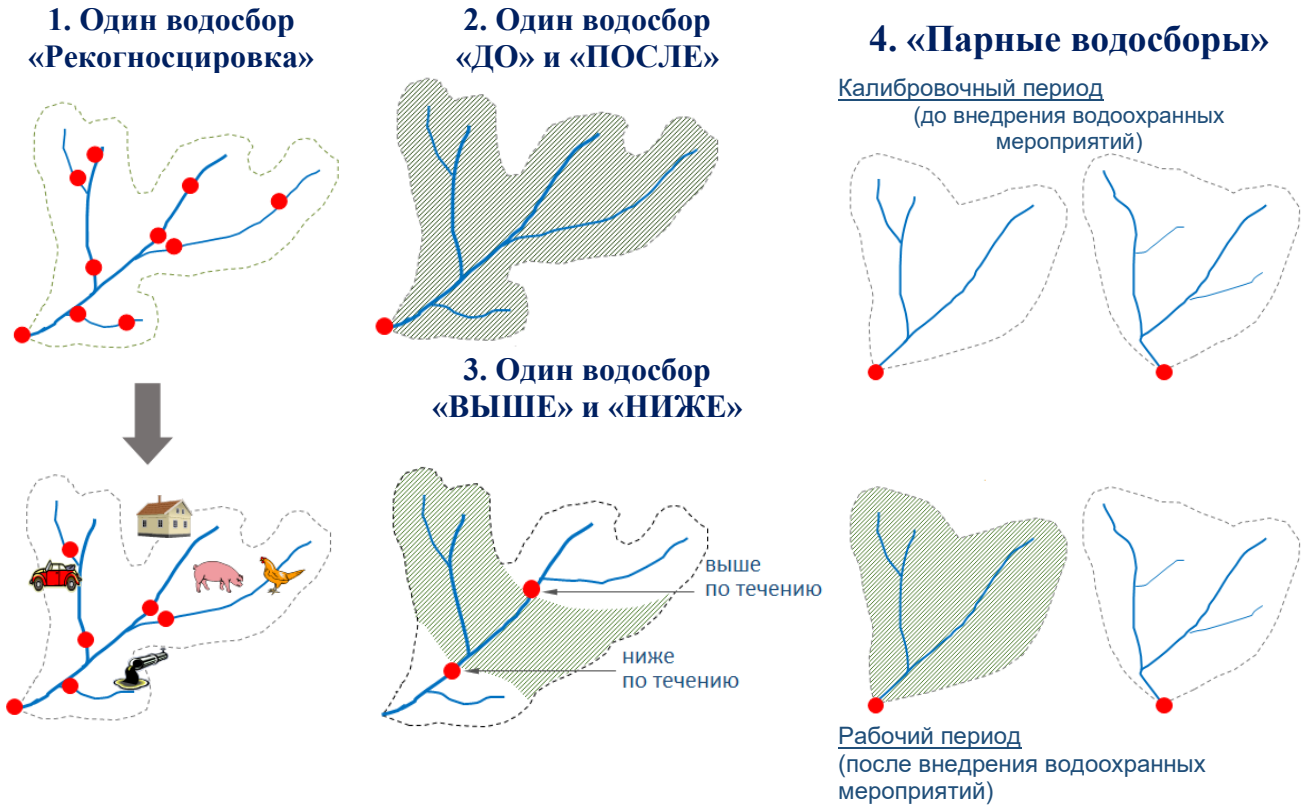


Рис. 2.10. Основные варианты проектов (схем) мониторинга диффузного загрязнения [29]

2.4.1 *Рекогносцировочные обследования*

Для выяснения предварительной картины формирования качества воды на водосборной территории проводятся рекогносцировочные обследования, включая:

- определение масштаба проблемы качества воды;
- получение предварительных данных в случае их недостатка или отсутствия (***Пример 15***);
- выделение проблемных водных объектов или их участков и соответствующих им участков водосбора.

Проводится анализ всей потенциально полезной информации о качестве воды, землепользовании, других характеристиках, систематизация собранных сведений в виде таблиц и графиков с последующей их интерпретацией на основе экспертных оценок. Например, концентрации ЗВ могут быть нанесены на график изменения расходов или уровней воды в реке для выявления связи с водностью или сравниваться с выбранными критериями качества на основе ПДК различных веществ. Также можно концентрации ЗВ нанести на схему водосбора, совместить их с гидрографической сетью или картой землепользования и проанализировать, существуют ли какие-нибудь закономерности изменения концентрации вдоль русла. Полученные данные химического анализа полезно увязать с результатами биологического мониторинга и/или результатами инспекционного обследования территории.

Пример 15

Организации наблюдений за диффузным загрязнением должен предшествовать тщательный анализ имеющихся данных существующих систем мониторинга различной ведомственной принадлежности, включая ознакомление с официальными государственными отчетами федерального и регионального уровней, данными лабораторного контроля, измеренными расходами воды и другой гидрометеорологической информацией, сведениями о структуре землепользования, информацией о загрязненности отдельных компонентов природной среды (почв, осадков и проч.), а также информацией о сосредоточенном загрязнении в пределах выбранного водосбора. Это даст возможность наиболее эффективно использовать выделенные для целей мониторинга технические и финансовые средства.

2.4.2 *Один водосбор «до» и «после»*

Данный подход основан на выборе одного водосбора, в замыкающем створе которого проводятся наблюдения за параметрами качества воды в периоды, предшествующие внедрению водоохранных мероприятий и последующие за таким внедрением. Подход применим для оценки объемов выноса тех или иных ЗВ с вышерасположенной водосборной территории для различных интервалов времени и фаз водного режима, а также для оценки эффективности водоохранных мероприятий.

2.4.3 *Один водосбор «выше» и «ниже»*

В этом случае наблюдательные створы располагают выше и ниже по течению реки относительно частного водосбора, на котором выявлен источник загрязнения и предполагается изучение условий формирования качества воды.

Отбор проб в двух створах должен производиться одновременно, также должны быть синхронизированы наблюдения за гидрологическим режимом (расходами воды), полезно также привлечение ежедневных данных с ближайшей метеостанции. Целесообразно применение автоматических анализаторов качества воды и измерителей расхода (при наличии возможностей их установки), а также желательно наличие удаленного доступа.

Для примера на рис. 2.11 приведены результаты эксперимента, проведенного летом 1998 г. на Иваньковском водохранилище [30]. В исследуемый период почти непрерывно шел дождь. Проводился отбор проб воды из водохранилища на участке протяженностью 12 км между двумя створами выше (о. Низовка) и ниже (д. Плоски) по течению (рис. 2.11а). Исследуемый участок характеризуется плотной береговой коттеджно-дачной застройкой, являющейся источником диффузного загрязнения водохранилища. На рисунке видно значительное увеличение содержания ЗВ в створе ниже по течению.

2.4.4 *Парные водосборы*

В данном случае требуются как минимум два водосбора: один из них – контрольный, на котором условия ведения хозяйственной деятельности и структура землепользования не меняются в течение всего времени исследований, а другой – опытный.

Наблюдения включают два основных периода:

- калибровочный (до начала внедрения водоохранных мероприятий);
- рабочий (во время и после реализации мероприятий).

В калибровочный период производится одновременный отбор проб воды и измерение других необходимых характеристик в течение достаточно продолжительного периода времени. Когда данные будут собраны, производится регрессионный анализ для выявления связи между характеристиками двух водосборов.

После того как такой анализ произведен и связь установлена, на опытном водосборе начинается внедрение водоохранных практик с одновременным продолжением параллельного отбора проб на обоих водосборах. По окончании этого периода вновь строятся регрессионные зависимости и анализируется степень их изменения.

2.4.5 *Экспериментальные (стоковые) площадки*

Подход может использоваться для различных целей, например для измерения интенсивности почвенной эрозии, изучения путей миграции ЗВ, для оценки способности различных сельскохозяйственных культур усваивать органические и минеральные удобрения (***Пример 16***).

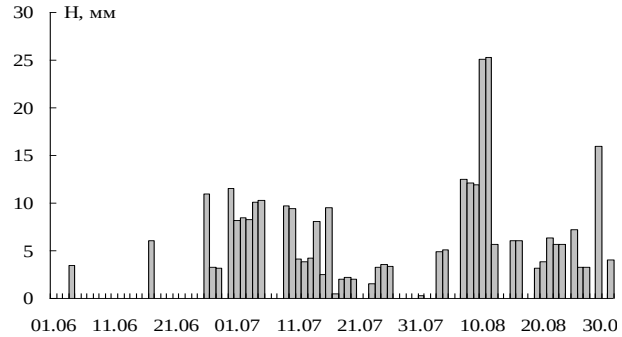
> ***Пример 16***
>
> Стоковая площадка представляет собой типичную по природным условиям часть исследуемой территории, ограниченную водонепроницаемыми бортиками и оборудованная для учета поверхностного стока и почвенной эрозии жидкого и твердого стока. Стоковая площадка должна иметь прямоугольную форму, длинная сторона которой расположена вдоль склона. Размер стоковый площадки зависит от уклона местности. Для сбора воды и почвенных частиц устанавливают специальные ловушки. Пробная почвенная площадка (согласно РД 52.18.770-2012) предназначена для отбора проб и детального исследования почвы. Пробные площадки должны быть расположены по ГОСТ 17.4.4.02 на одном элементе мезорельефа (вершина, холм, склон, подножие склона и т.д.), в ее пределах должен быть однородный почвенный и растительный покров.

Экспериментальные площадки предоставляют подробную информацию о гидрологических процессах и условиях формирования качества воды, поскольку масштаб исследования ограничивается водосборной территорией всего в несколько гектаров. Целесообразно, чтобы площадки были приспособлены для измерения поверхностного и почвенного стока воды или эрозии.

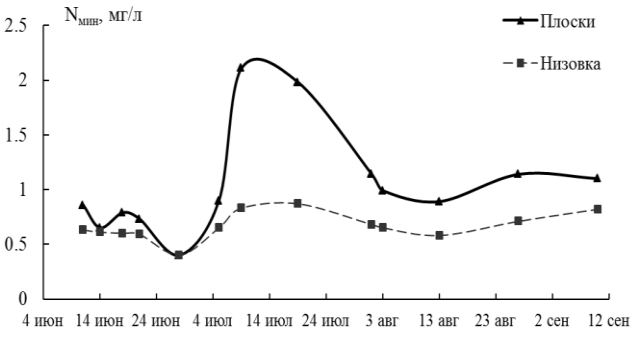
Наблюдения требуют постоянного оборудования для проведения детальных метеорологических наблюдений и измерения расходов воды, автоматического отбора проб.

Основным недостатком подхода является то, что результаты не могут быть непосредственно перенесены на весь водосбор. Поэтому наблюдения на таких площадках носят вспомогательный характер.

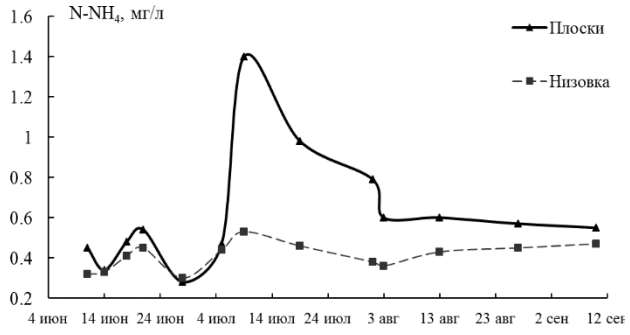
а



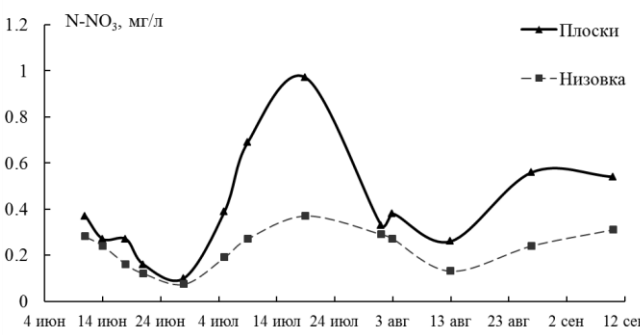
б



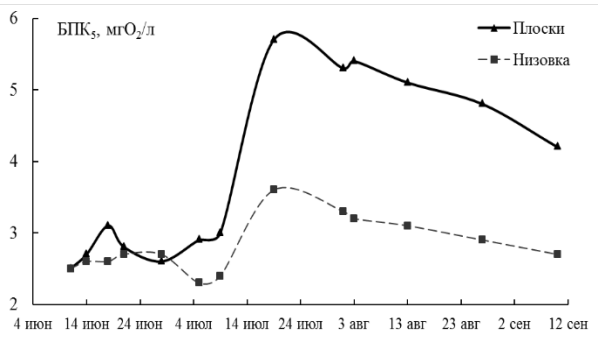
в



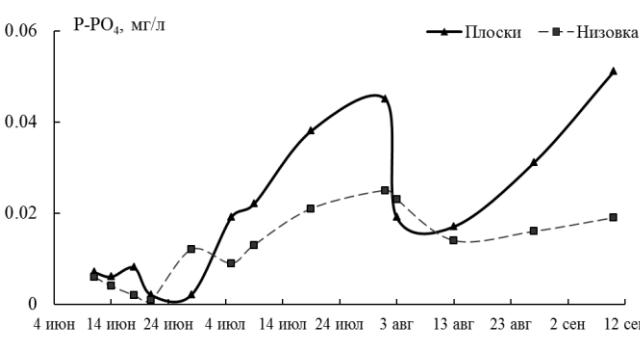
г



д



е



ж

Рис. 2.11. Результаты исследования формирования диффузного загрязнения Иваньковского водохранилища от коттеджно-дачной застройки летом 1998 г.:
а – расположение исследуемого участка; б – суточный ход осадков в д. Плоски; изменение концентрации ЗВ в створах о. Низовка (выше по течению) и д. Плоски (ниже по течению):
в – азота минерального, г – азота аммонийного, д – азота нитратного,
е – органических веществ, оцениваемых по $БПК_5$, ж – фосфатов [30]

Контрольные вопросы и задания к главе 2

1. С какими целями проводится государственный мониторинг состояния водных объектов?

2. Почему государственный мониторинг состояния водных объектов не вполне соответствует требованиям мониторинга загрязнения водных объектов от диффузных источников?

3. Перечислите органолептические признаки ухудшения качества воды в результате поступления ЗВ от диффузных источников.

4. По рисункам 2.4 и 2.5 определите регионы, которые характеризуются повышенными значениями показателей диффузного загрязнения водных объектов.

5. Поясните, как могут быть связаны количество переработанных коммунальных отходов и диффузное загрязнение водных объектов (рис. 2.6).

6. Каковы основные задачи мониторинга диффузных источников загрязнения водных объектов?

7. Учет каких четырех принципов необходим при организации мониторинга диффузных источников?

8. По рис. 2.8 поясните, как изменяется содержание ЗВ в водном объекте в зависимости от фазы водного режима и почему. Почему содержание ЗВ в начальной стадии формирования половодья значительно превышает их содержание в водном объекте в начальной стадии формирования паводков?

9. По рис. 2.9 опишите, как связаны между собой водный и диффузный сток.

10. Для чего предназначены стоковые площадки?

11. Оцените эффективность (%) водоохранных мероприятий от диффузного загрязнения по результатам его мониторинга по схеме «один водосбор до и после». До проведения водоохранных мероприятий содержание нефтепродуктов в речной воде составляло 1,2 мг/л, после их проведения – 0,3 мг/л.

12. При проведении мониторинга диффузного загрязнения водного объекта по схеме «один водосбор – выше и ниже» измерены концентрации в речной воде взвешенных веществ: $С_{выше}$ = 15 мг/л, $С_{ниже}$ = 25 мг/л. Расход воды в реке во время проведения измерений

составил 13,5 $м^3$/с. По данным измерений рассчитайте диффузный сток, поступающий с частного водосбора в реку за сутки, за год.

13. Определите вклад (%) диффузных источников в загрязнение городской реки различными ЗВ, если известно, что всего с территории города N в реку поступает: 2070800 т/год взвешенных веществ, 256480 т/год органических веществ, оцениваемых по показателю ХПК, 268 т/год фенолов и 19 т/год меди. В то же время, согласно данным статистического учета водопользователей через все точечные источники города в реку сбрасывается: 140910 т/год взвешенных веществ, 166125 т/год органических веществ, оцениваемых по показателю ХПК, 48 т/год фенолов и 17 т/год меди.

III КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ДИФФУЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ: ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Гидролого-гидрохимические модели формирования на водосборе качества воды – это модели, описывающие отдельные процессы и их взаимодействие, происходящие на водосборе и приводящие к формированию определенного химического состава воды водного объекта.

Интенсивное развитие методов расчета загрязнения водосборных территорий происходило с 1960-х годов, главным образом, в связи с загрязнением окружающей среды в результате внесения удобрений на сельскохозяйственные поля. В простейших методиках использовались, в основном, эмпирические методы расчета количества смыва ЗВ с загрязненных территорий на основе корреляционных связей с гидрологическими параметрами [31]. Модель CREAMS (*Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management System*) [32] была одной из первых концептуальных моделей формирования качества вод в пределах однородного участка водосбора или в масштабе поля (field scale), включающих описание процессов. Со второй половины 1990-х - начала 2000-х годов для решения задач диффузного и точечного загрязнения используются пространственно-распределенные или полураспределенные физически обоснованные модели формирования качества воды. Небольшие суббассейны, или так называемые hydrological response units (HRU) внутри суббассейнов, которые являются однородными по типу почвы, землепользованию и высоте над уровнем моря используются в качестве расчетных единиц в таких моделях [33].

К настоящему времени разработано и используется для решения конкретных задач большое количество моделей качества воды, различающихся подходами, использованным математическим аппаратом, степенью детализации описания процессов в компонентах геосистемы водосбора, пространственно-временными масштабами, требованиями к исходной информации и экономическими факторами. В современных наиболее детальных математических моделях формирования качества воды рассматривается последовательное решение четырех основных задач: моделирование процессов гидрологического цикла суши; моделирование процесса водной эрозии почв; моделирование функционирования растительного

покрова и продукционных процессов; моделирование процессов формирования и выноса химического стока.

Водный фактор является той средой, благодаря которой ЗВ мигрируют в пределах речного бассейна (как по вертикали, так и по горизонтали) и выносятся за его пределы речным стоком. Поэтому *гидрологический блок* в моделях качества воды является основным. Моделирование гидрологического цикла суши включает процессы преобразования осадков в речной сток, каждый из которых может быть представлен в виде отдельных расчетных блоков, например, таких как, модель перехвата жидких осадков растительностью, модель инфильтрации воды в почву, модель формирования талого стока, модель поверхностного склонового стока, метод расчета испарения с поверхности снежного покрова под пологом леса, модель внутрипочвенного стекания и др. Модели процессов гидрологического цикла подробно рассмотрены в [34].

Процессы смыва почвы и грунта со склонов и формирование твердого стока описываются в *блоке эрозии почвы*. Во многих моделях качества воды этому блоку уделяется существенное внимание, так как значительное количество ЗВ перемещается и поступает в водные объекты с поверхностным стоком в сорбированном на твердых взвесях виде. Различают модели дождевой эрозии почв и эрозии при весеннем половодье.

При выпадении дождя поверхностный слой почвы увлажняется, а в результате ударного действия капель происходит диспергирование почвенных агрегатов и закупорка порового пространства. Водопроницаемость почвы резко уменьшается и начинает формироваться склоновый поток. Стекание воды со склона происходит как сплошной пеленой (межручейковая эрозия), так и через ручейковую сеть (ручейковая эрозия), формирующуюся в процессе выпадения дождя.

В результате удара капель о почву (покрытую водной пленкой) происходит отрыв и диспергирование почвенных агрегатов, которые или сразу попадают в ручейковую сеть (если она формируется) или сначала попадают в межручейковое пространство, а затем вместе с водой перемещаются в ручейковый поток. Этот поток обладает значительной способностью к размыву, что приводит к значительным потерям почвы со склона. Однако склоновые потоки имеют ограниченную транспортирующую способность, и при ее превышении может происходить отложение почвы (особенно при наличии

выположенных участков). Наличие растительности значительно снижает эрозионные процессы.

В настоящее время существует и используется большое количество моделей дождевой эрозии, полученных при различных подходах к описанию эрозионных процессов [35-52].

Одной из самых известных и широко применяемой эмпирической эрозионной моделью является «универсальное уравнение почвенной эрозии» USLE (*Universal Soil Loss Eguation*) [53, 54]. В уравнении учитываются такие факторы как параметры склона, тип почвы, агрофон, интенсивность дождя, кинетическая энергия дождевых капель и глубина потока. Широкомасштабные исследования по обоснованию этого уравнения были начаты в США в 1954 г. [55]. В частности, были использованы результаты наблюдений более чем 8000 годоплощадок, расположенных в 21 штате. Полученные по этим площадкам выводы с помощью уравнения USLE распространялись на другие условия, которые в разумных пределах отличались от стандартных.

Учитывая, что универсальное уравнение имеет ряд существенных недостатков, проводилось его усовершенствование по следующим направлениям: замена эрозионного индекса дождя на другие параметры [50, 56, 57]; учет переменной крутизны вдоль профиля склона [58]; применимость уравнения для водосбора [59] и др.

В весенний период в результате таяния снега формируются склоновые потоки, которые обусловливают смыв почвы, физический механизм которого изучен недостаточно. Сложность гидротермических процессов, протекающих на склонах в период весеннего снеготаяния, с одной стороны, и практически экспериментальная не изученность механизма эрозии, с другой, привели к тому, что для расчета смыва мерзлой почвы разработаны только чисто эмпирические методы. В частности, в методике ГГИ [40] для расчета смыва почвы в период весеннего половодья рекомендуется зависимость, аналогичная для дождевого стока, но с другими значениями параметров. В работе [60] на базе этой же методики рассмотрен способ расчета пространственных полей смыва почвы со склонов водосбора в период весеннего половодья для различных сценариев землепользования в бассейне на основе физико-математической модели формирования талого стока. Для расчета смыва почвы Г.П. Сурмачем предложена зависимость [36],

учитывающая характеристики склона, тип почвы и ее эродированность, мехсостав, неравномерность снегоотложения и агротехнический фон. Часто для расчета смыва почвы при снеготаянии используется универсальное уравнение, в котором вместо эрозионного индекса дождя вводится величина запаса воды в снеге, выпавшего за период декабрь – март [53, 61].

Функционирования растительного покрова и продукционные процессы описываются в *блоке роста растительности и сельскохозяйственных культур*. Растительный покров является важным участником процессов энерго- и массообмена в системе «почва – растительность – приземный слой атмосферы». Основные физиологические процессы жизнедеятельности растений: фотосинтез и дыхание, процессы роста, развития и старения, адаптивные механизмы тесно связаны с гидрологическим циклом и круговоротом биогенных веществ.

В [62] де Вит предложил различать четыре уровня – модели продуктивности сельскохозяйственных культур. На первом уровне продуктивности рост растений происходит в условиях обеспеченности питательными веществами и почвенной влагой. Скорость роста определяется условиями погоды. Факторами, ограничивающими скорость роста, являются интенсивность радиации, степень ее поглощения и использования растениями. Эффективность использования световой энергии посевами является характеристикой данного вида растений и плотности растительного покрова. Модели первого уровня продуктивности могут быть использованы в тех случаях, когда влагообеспеченность и условия минерального питания не ограничивают продуктивность.

На втором уровне продуктивности рост растений лимитируется дефицитом влаги, но при достаточной влагообеспеченности скорость роста повышается до максимального значения, которое определяется погодой. Ключевыми факторами на этом уровне продуктивности служат доступность почвенной влаги и эффективность ее использования в растениях. Дефицит влаги заставляет растения закрывать устьица и приводит к сокращению ассимиляции CO_2 и транспирации. Поэтому скорости обоих процессов находятся в тесной связи. На третьем и четвертом уровнях продуктивности рост лимитируется недостатком минерального питания (азота и фосфора).

Несмотря на то, что в действительности часто встречаются гораздо более сложные системы, анализ уровней продуктивности

может рассматриваться как основа для установления причинно-следственных связей для процессов функционирования растительного покрова. Подобный анализ, построенный на зависимости физиологических процессов от внешних факторов, применим ко всем ситуациям, в которых растения растут как в условиях сельскохозяйственного производства, так и в естественных условиях.

Началом математического моделирования продукционного процесса растительного покрова считается 1953 г., когда появилась работа Монси и Саэки [63], в которой построена модель функционирования растительного покрова в зависимости от солнечной радиации, относительной площади листьев и их ориентации в пространстве. Концептуальные модели жизнедеятельности растения с учетом фотосинтеза листа в зависимости от внешних условий (приходящей прямой солнечной и рассеянной радиации, концентрации углекислого газа в окружающем воздухе и др.) и архитектоники посева были разработаны в [64-66]. В работе австралийских ученых [67] впервые сформулировано уравнение роста растения, как разность между фотосинтезом и затратами на дыхание. В работе Хирои и Монси [68] дыхание разделено на дыхание поддержания и дыхание роста, заложены основы количественного описания распределения ассимиляторов по органам растения.

В работах отечественных исследователей [69, 70] сформулированы общие принципы построения теории моделирования продукционного процесса. Россом Ю.К. [71] разработана математическая модель посева, в которой детально рассмотрено влияние ориентации листьев, радиационного и температурного режимов на фотосинтез, предложена система уравнений для описания роста отдельных органов растения.

В работах [72, 73] представлены комплексные динамические модели, объединяющие в одну систему отдельные процессы биопродуктивности растений и учитывающие законы массо- и энергопереноса. В монографии [72] представлена модель фотосинтеза, транспирации и продуктивности растений в условиях недостатка почвенной влаги. В модели подробно рассмотрены передвижение воды в системе «почва-растение-атмосфера», тепловой баланс листа и механизм устьичной регуляции, через который осуществляется взаимосвязь между транспирацией и фотосинтезом. Проведенные авторами численные эксперименты дают представление о роли и

характере влияния метеорологических, почвенных и биофизических параметров на продуктивность отдельного растения.

В модели «погода-урожай» [73] детально учтен энерго- и массообмен в системе «почва-растение-атмосфера». Фотосинтез описывается уравнением Шартъе, рост - уравнениями Росса, распределение ассимиляторов по органам растений тесным образом связано с фазой развития растения в течение вегетационного периода. В модели введена функция пожелтения, описывающая процессы старения вегетативных органов, учитываются неблагоприятные для растений факторы внешней среды. В [62] представлена модель SUCROS, позволяющая рассчитывать динамику накопления сухого вещества посева от фазы всходов до созревания в зависимости от суточных сумм радиации и температуры воздуха.

Моделирование *формирования и выноса химического стока* описывается в соответствующих блоках моделей формирования качества воды. В химическом блоке обычно рассматриваются следующие основные процессы:

- для консервативных ЗВ – разбавление (с учетом процессов конвекции и диффузии), растворение, сорбция/десорбция, осаждение/ресуспендирование;
- для неконсервативных ЗВ (например, азота и фосфора) дополнительно учитываются процессы трансформации под влиянием биологических/микробиологических и физико-химических факторов.

Процессы конвекции и диффузии ЗВ в потоках (в поверхностном, внутрипочвенном стоке, при миграции раствора в почве и т.д.) могут быть описаны на основе гидродинамических уравнений, используемых в гидрологическом блоке. Процесс сорбции вещества из раствора почвой обычно описывается изотермами сорбции Фрейндлиха или Ленгмюра, которые устанавливают связь между количеством сорбированного вещества и его концентрацией в растворе. Вид изотермы (равновесная или неравновесная, линейная или нелинейная) и ее параметры устанавливаются для конкретного загрязнителя на основе физических экспериментов.

Для описания процесса растворения ЗВ (например, удобрений на поверхности почвы) обычно используются линейные зависимости потока растворенного вещества от разности максимально возможной и текущей концентрации в потоке. Иногда учитывается влияние на концентрацию растворенного вещества его содержание в сорбированном виде на твердых частицах. Процессы трансформации

вещества в результате его биологического потребления растениями, гидролиза, распада и других превращений описываются уравнением кинетики. Для большинства ЗВ обычно принимается кинетика первого порядка.

Специализированные комплексные модели, направленные на детальное изучение трансформации биогенных веществ (например, процессы разложения органических веществ, нитрификации и денитрификации, синтез органического вещества из неорганических веществ и др.) включают в себя дополнительно отдельные блоки, описывающие:

- физиологические процессы почвенных микроорганизмов и влияние на них различных агротехнических приемов обработки почвы;
- влияние особенностей трансформируемых органических веществ и соотношение содержания в них C:N на направленность процессов минерализации/иммобилизации органических веществ;
- производство первичной продукции и влияние на это производство содержания CO_2 в атмосфере и др.

В следующих работах рассмотрены различные аспекты моделирования неконсервативных загрязняющих веществ [74-89].

Далее в разделе приведен краткий обзор известных в мировой практике моделей формирования качества воды в речных бассейнах. Обзор включает модели разного уровня сложности, используемые в различных пространственных и временных масштабах для оценки загрязнения территорий характерными ЗВ. Некоторые пространственно распределенные модели описаны более подробно (в п.3.3), также приведены отдельные примеры их применения для исследования формирования загрязнения водных объектов от различных типов диффузных источников, в том числе в условиях изменения климата и землепользования.

3.1 Модели для сельскохозяйственных территорий

К этой категории относятся модели, на однородном участке сельскохозяйственно освоенной территории (поле, луг, пастбище) описывающие миграцию и трансформацию в почвенном профиле биогенных веществ, вымывание из почвы удобрений и пестицидов и других сельскохозяйственных загрязнителей. В модели входит блок процессов микробиологических преобразований азота

(минерализации/иммобилизации, нитрификации, денитрификации), которые описываются уравнениями кинетики первого порядка. Для лучшего описания кинетики процессов используется замена разлагающегося в почве органического вещества на пулы различных видов органических веществ, разлагающихся параллельно. Каждому пулу назначается скорость потенциального разложения, которая определяется на основании экспериментального разложения различных химических компонентов органического материала. Как правило, модели имеют суточный временной шаг моделирования.

Достаточно большое количество моделей сельскохозяйственных территорий, по-видимому, является результатом различий в условиях окружающей среды, методах ведения сельского хозяйства, а также различий в имеющихся исходных данных. В табл. 3.1 приводится краткое описание таких моделей.

Модель **CREAMS** (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*) [32] - одной из первых концептуальных field scale моделей формирования качества вод, предназначенная для расчета выноса химикатов с площадей с равномерным распределением гидрогеохимических характеристик. Модель включает описание гидрологического, эрозионного и химического блоков, и базируется на постулате о том, что водный фактор является средой, благодаря которой ЗВ мигрируют как в пределах сельскохозяйственных полей (по вертикали и по горизонтали), так и выносятся за их пределы речным стоком. При наличии подробной по времени информации об осадках в гидрологическом блоке для расчета впитывания осадков в почву используется известное уравнение Грина-Эмпта, а поверхностный сток рассчитывается по уравнениям кинематической волны. Если имеются лишь среднесуточные данные об осадках, то поверхностный сток рассчитывается по эмпирическому уравнению в зависимости от осадков, типа почв, предшествующего увлажнения и способа обработки почв. Смыв почвы рассчитывается по модифицированному уравнению USLE [53], а осаждение наносов предполагается при мутности, превышающей транспортирующую способность потока. В химическом блоке модели рассматривается баланс массы вещества в поверхностной и корневой зонах почвогрунтов. Скорость изменения концентрации вещества в потоке в поверхностном стоке или при инфильтрации воды рассчитывается как линейная функция от разности концентраций в почве и в потоке и пропорционально

скорости потока. Для описания процессов сорбции-десорбции используется изотерма равновесной мгновенной сорбции. Рассчитывается вынос химикатов, в частности биогенных элементов, в растворенной и взвешенной формах.

Таблица 3.1. Модели формирования качества воды в речном бассейне (масштаб поля и слоя почвенных вод)

Название модели	Происхождение/ разработчик	Цель разработки/ моделируемые вещества	Степень описания процессов*
ANIMO *Agricultural NItrogen MOdel*	Wageningen University and Research Centre в г. Вагенинген Нидерланды; 1991 [90]	Выщелачивание азота из почвы в поверхностные и грунтовые воды	механистическая
EPIC *Erosion-Productivity Impact Calculator*	Министерство сельского хозяйства США (USDA); 1984 [91]	Оценка влияния эрозии почвы на ее продуктивность, круговорот биогенных веществ и экономику сельского хозяйства	концептуальная
GLEAMS *Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*	Министерство сельского хозяйства США (USDA); 1987 [92-94]	Оценка воздействия методов управления на транспорт пестицидов и биогенных веществ через корневую зону растений, оценка поверхностного стока и эрозии	концептуальная
CREAMS *Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*	Министерство сельского хозяйства США (USDA); 1980 [32, 95]	Расчет выноса биогенных веществ (растворенных и сорбированных на взвешенных частицах) и их содержания в поровых водах корневой зоны растений	концептуальная
HYDRUS/ SWMS	Министерство сельского хозяйства США (USDA); 1996 [96, 97]	Анализ движения воды и растворенных веществ в пористых средах с переменной насыщенностью	механистическая
MACRO	Шведский университет сельскохозяйственных наук; 1994 [98, 99]	Транспорт растворенных веществ в пахотных почвах	механистическая
PEARL *Pesticide Emission Assessment at Regional and Local scales*	Alterra Green World Research и Национальный институт общественного здравоохранения и окружающей среды, Нидерланды; 2000 [100]	Трансформация пестицидов в почвенно-растительной системе и оценка их вымывания в подземные воды	концептуальная/ механистическая
PRZM *Pesticide Root Zone Model*	Агентство по охране окружающей среды США (US EPA); 1984 [101, 102]	Миграция пестицидов в корневой зоне растений	механистическая

SOIL-N (Coup Model)	Шведский университет сельскохозяйственных наук; 1987 [78, 103, 104]	Миграция и трансформация азота в почвенном профиле	механис-тическая
WAVE *Water and Agrochemicals in the soil, crop and Vadose Environment*	Лёвенский католический университет, Бельгия; 1995 [105, 106]	Перенос и трансформация воды, тепла и агрохимикатов в вертикальном направлении	механис-тическая

*Концептуальные модели основаны на статистических и эмпирических связях, лишь отдельные процессы физически обоснованы; механистические (физически обоснованные) модели, в которых все процессы описаны на основе физических, химических и биологических законов [114]

ANIMO (*Agricultural NItrogen Model*) моделирует циклы азота, углерода и фосфора в ненасыщенных и насыщенных почвенных системах. Модель разработана для анализа выщелачивания азота с поверхности почвы в грунтовые и поверхностные воды. Модельная система представляет собой многослойный одномерный грунтовый столб, верхняя граница которого – поверхность почвы, нижняя граница на глубине локального потока подземных вод. Кроме процессов минерализации, иммобилизации, нитрификации и денитрификации в модель добавлены процессы, связанные с частичным или временным анаэробиозом, распределением кислорода и температуры в почве, процессы десорбции и адсорбции аммония и фосфора в почвенном комплексе.

Модель **EPIC** (*Erosion-Productivity Impact Calculator*) разработана для оценки влияния эрозии почвы на ее продуктивность и может использоваться для определения влияния различных стратегий управления на почвенные и водные ресурсы и сельскохозяйственное производство. Площадь исследуемого участка территории не должна превышать 100 га и иметь однородные погодные, почвенные условия и системы земледелия. В модели описываются метеорологические и гидрологические процессы, эрозия, круговорот биогенных веществ, транспорт пестицидов, рост растений, изменение температуры почвы, различные способы обработки почвы. Последние усовершенствования модели включают блоки, связанные с качеством воды и глобальным изменением климата: влияние максимального водного стока на формирование твердого стока, влияние содержания CO_2 в атмосфере на рост урожая и водные ресурсы.

SOIL-N (Coup Model) - одномерная модель, описывающая динамику азота и его потери в почвенном профиле пахотных земель. Гидрологическая модель описывает инфильтрацию и движение воды между почвенными слоями, содержание незамерзшей воды в почве и

ее температуру. Блок трансформации биогенных веществ включает следующие процессы: минерализацию гумуса, минерализацию/иммобилизацию углеродной и азотной фракций в растительных остатках и навозе; нитрификацию, денитрификацию, выщелачивание нитратов, поглощение биогенов растениями. Все биологические процессы в модели зависят от состояния почвы и температуры. Почва делится на слои, из которых растения получают азот с различной скоростью. Транспорт нитратов определяется как произведение водного стока и концентрации нитратов в почвенном слое. Аммоний в модели считается неподвижным в почвенном профиле. В [107] приводится пример использования модели SOIL-N для сравнительного анализа выщелачивания нитратов при альтернативных методах ведения сельского хозяйства.

3.2 Модели для урбанизированных территорий

Одной из первых моделей для описания гидрологических процессов на урбанизированной территории стала модель **STORM** (*Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model*), разработанная Гидрологическим инженерным центром (HEC) корпуса инженеров армии США [108]. Модель включает упрощенные процедуры расчета водного стока и качества воды с временным интервалом моделирования в 1 час. На основе данных о слое выпадающих в течение часа осадков проводится расчет водного стока на основе взвешенного по площади коэффициента стока. Модель не содержит процедуры маршрутизации потока, и расчет движения воды по системе городской канализации в модели отсутствует. Предполагается, что жидкий сток проходит через очистные сооружения, пока их емкость это позволяет. В противном случае ливневой сток отводится во временный резервуар, а при переполнении последнего ливневой сток поступает в приемный водоем без очистки. Таким образом схема моделирует комбинированные перетоки канализации.

В модели предполагается, что накопление ЗВ на городской территории линейно увеличивается, а их смыв описывается экспоненциальной кинетикой первого порядка. Эрозия моделируется с помощью универсального уравнения почвенной эрозии (USLE). Одновременно могут моделироваться концентрации до шести ЗВ, таких как: взвешенные наносы, осаждаемые наносы; органические

вещества, фиксируемые по показателю БПК; общие колиформные бактерии, ортофосфаты и азот. Поскольку параметры накопления и смыва ЗВ в модели регулируются, то под видом вышеперечисленных могут быть смоделированы другие ЗВ [109].

Первоначальная версия модели **SWMM** (*Storm Water Management Model*) была разработана в 1969-1971 годах при поддержке Агентства по охране окружающей среды США и была ориентирована на расчет ливневого стока в городской канализационной системе для отдельного события – ливня [110]. С тех пор она претерпела несколько серьезных обновлений и в настоящее время представляет возможность и для непрерывного моделирования стока [111]. Последняя версия SWMM была подготовлена Отделом водоснабжения и водных ресурсов Национальной исследовательской лаборатории управления рисками Агентства по охране окружающей среды США. Программа находится в открытом доступе и широко используется во всем мире для планирования, анализа и проектирования, связанных с ливневыми стоками, комбинированной и бытовой канализацией и естественными дренажными системами в городских районах. Модель может использоваться: для расчета компонентов дренажной системы для борьбы с наводнениями; расчетов по минимизации комбинированных перетоков канализации, оценки эффективности лучших практик управления (ЛПУ - Best Management Practices) для снижения загрязнения во время дождей; картографирования затапливаемых систем естественных русел и др. Результаты моделирования представляются в виде карт водосборной площади и дренажных систем с цветовой кодировкой, графики и таблицы временных рядов, графики профилей и статистический частотный анализ временных рядов [112].

В гидрологическом блоке модели учитываются процессы, формирующие сток с городской территории: выпадение осадков, испарение стоячей воды, накопление и таяние снега, инфильтрация осадков с поверхности в горизонты грунтовых вод, переток вод между подповерхностными водами и дренажными системами и др. Для учета пространственной изменчивости этих процессов городская водосборная территория разделяется на более мелкие, однородные участки, каждый из которых содержит свою долю проницаемых и непроницаемых подобластей. Процесс формирования гидрографа стока моделируется на основе подхода нелинейного резервуара, в котором предусмотрена возможность учета снеготаяния. По желанию

пользователя, сток может быть описан и более сложными моделями (кинематическая волна, комплексные динамические уравнения).

В блоке формирования качества воды городского стока учитываются следующие процессы: накопление ЗВ в сухую погоду, непосредственное выпадение загрязненных осадков, смыв накопленных ЗВ во время дождей, снижение накопления ЗВ в сухую погоду за счет уборки улиц и ЛПУ. Процессы формирования качества воды воспроизводятся на основе различных подходов: модель «накопление-смыв», метод рейтинговой кривой, метод постоянных концентраций или модель USLE. В модели предусмотрен блок, моделирующий процессы, происходящие в очистных сооружениях. Предполагается, что очистка стока проходит по кинетике первого порядка, сопряженной с моделями реакторов полного смешения или полного вытеснения, или за счет осаждения взвешенных частиц, которое пропорционально времени нахождения стока в отстойнике.

Маршрутная часть модели транспортирует водный сток и ЗВ через систему каналов, труб, устройств хранения и очистки, насосов и регуляторов. Модель отслеживает количество и качество стока, а также скорость и глубину потока в каждой трубе и канале в течение периода моделирования. В SWMM могут моделироваться следующие типы регуляторов водного потока: отверстия, водосливы и спуски. Отверстия и водосливы используются для моделирования выпускных и отводных конструкций в дренажных системах. Отверстия могут иметь круглую или прямоугольную форму, располагаться внизу или сбоку от узла, расположенного выше по потоку, и иметь заслонку для предотвращения обратного потока. Спуск представляет устройство управления потоком и используется для моделирования особых соотношений напора и расхода, которые нельзя охарактеризовать с помощью насосов отверстий и водосливов.

3.3 Универсальные модели

Универсальные модели применяются для исследования формирования качества воды в пределах целых водосборов, включающих территории различных типов: урбанизированные и не урбанизированные (в том числе сельскохозяйственные). Краткий обзор универсальных моделей приведен в табл. 3.2. Более подробно описаны пространственно распределенные модели SWIM, HYPE и ECOMAG-HM.

Таблица 3.2. Универсальные модели формирования качества воды в речном бассейне (масштаб водосбора)

Название модели	Происхождение/ разработчик	Цель разработки/ моделируемые вещества	Степень описания процессов*	Распределение	
				во времени	в пространстве
AGNPS *AGricultural Non-Point Source pollution model*	Министерство сельского хозяйства США (USDA), 1986 [113]	Исследование влияние эрозии почвы в с/х-ных и городских районах на качество воды; биогенные вещества (азот и фосфор), пестициды	концептуальная	модель одного события (отдельного дождя)	с рассредоточенными параметрами
HBV-N *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*	Шведский метеорологический и гидрологический институт (SMHI), 1994 [114, 115]	Контроль эвтрофикации, транспорт азота в пределах водосбора от неточечных и точечных источников	концептуальная	непрерывная	полураспределенная
HSPF *Hydrological Simulation Program - FORTRAN*	Агентство по охране окружающей среды США (USDA), 1980 [116, 117]	Моделирование процессов, связанных с количеством и качеством воды, выносом наносов, биогенных веществ, пестицидов, бактерий с городского или сельскохозяйственного водосбора, с проницаемых и непроницаемых участков; перенос и трансформация ЗВ в водном объекте	концептуальная / механистическая	непрерывная	с рассредоточенными параметрами
INCA *Integrated Nitrogen in CAtchments*	Университет Рединга, UK, 1998 [118]	Трансформации и миграция азота, контроль эвтрофикации	концептуальная / механистическая	непрерывная	полураспределенная

MAGIC *Model of Acidification of Groundwater in Catchments*	Департамент наук об окружающей среде, Университет Вирджинии, США, 1985 [114]	Контроль закисления почвы и воды/ транспорт азота в поровых водах	концептуальная / механистическая	непрерывная	сосредоточенная
MERLIN *Model of Ecosystem Retention and Loss of Inorganic Nitrogen*	Департамент наук об окружающей среде, Университет Вирджинии, США, 1997 [114]	Контроль закисления / биогеохимические циклы азота и углерода в экосистемах	концептуальная	непрерывная	с рассредоточенными параметрами
MIKE SHE	Датский гидравлический институт, 1993 [114]	Анализ, планирование и управление водными ресурсами и спектром экологических проблем	механистическая	непрерывная	распределенная
SHETRAN	Лаборатория исследования систем водных ресурсов, Университет Ньюкасла, UK; 1996 [119]	Изучение экологических последствий загрязнения на водосборе, эрозии, изменений в землепользовании и климате	механистическая (физически-обоснованная)	непрерывная	распределенная
SMART *Simulation Model for Acidification's Regional Trends*	Wageningen University and Research Centre в г. Вагенинген Нидерланды; 1989 [114]	Изучение регионального закисления почвы и круговорота биогенных веществ	механистическая	годовой временной шаг	
SWAT *Soil and Water Assessment Tool*	Министерство сельского хозяйства США (USDA), 1993 [120-122]	Прогноз влияния управленческих решений на качество воды, наносы, биогенные вещества и пестициды для крупных и сложных речных бассейнов	концептуальная / механистическая (физически обоснованная)	непрерывная, ежемесячная или годовая	распределенная

*Концептуальные модели основаны на статистических и эмпирических связях, лишь отдельные процессы физически обоснованы; механистические (физически обоснованные) модели, в которых все процессы описаны на основе физических, химических и биологических законов [114]

SWIM (*Soil and Water Integrated Model*) пространственно распределенная концептуальная динамическая модель речного бассейна, с непрерывным шагом по времени моделирующая гидрологические процессы, биогеохимические циклы биогенных веществ (азота и фосфора), рост сельскохозяйственных культур и естественной растительности, эрозию и транспорт наносов. Модель разработана в Потсдамском институте исследований климатических изменений на основе моделей SWAT и MATSALU (рис. 3.1).

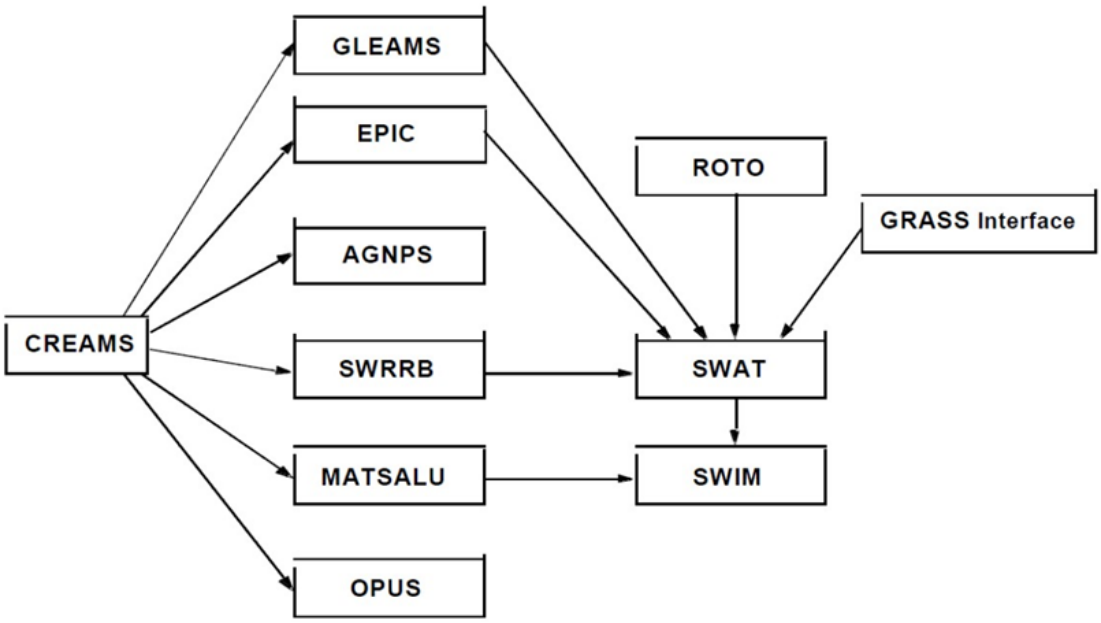


Рис. 3.1. Разработка моделей на основе CREAMS (Источник [127])

Модель MATSALU, разработанная на основе CREAMS и имеющая структуру аналогичную SWAT, была использована для оценки различных сценариев управления эвтрофикацией сельскохозяйственного бассейна залива Матсалу площадью 3500 км^2 на побережье Балтийского моря в Эстонии [123].

В течении нескольких лет (1996-1999 гг.) SWIM подвергалась всесторонним испытаниям и валидации в ряде мезомасштабных бассейнов в Германии (в основном относящихся к району стока реки Эльбы) в отношении моделируемых процессов. В результате исследований модель была рекомендована к применению в речных бассейнах с площадью 100-10000 км^2, которые можно параметризовать с помощью информации, доступной в регионе [124, 125].

Как и модель MATSALU, SWIM имеет трехуровневую схему дезагрегирования области моделирования «бассейн - суббассейны – гидротопы» (рис. 3.2) и связана с ГИС GRASS. Исследуемый бассейн

делится на суббассейны с приемлемой средней площадью, затем каждый суббассейн – на гидротопы, имеющие одинаковые землепользование и тип почвы, и которые соответствуют «единицам гидрологического отклика» Флюгеля (Hydrologic Response Units, HRU - Flügel) [126].

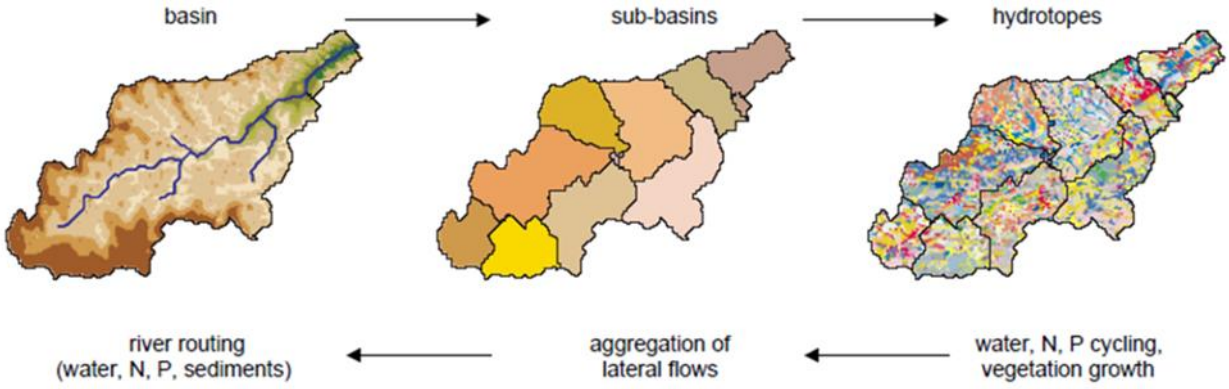
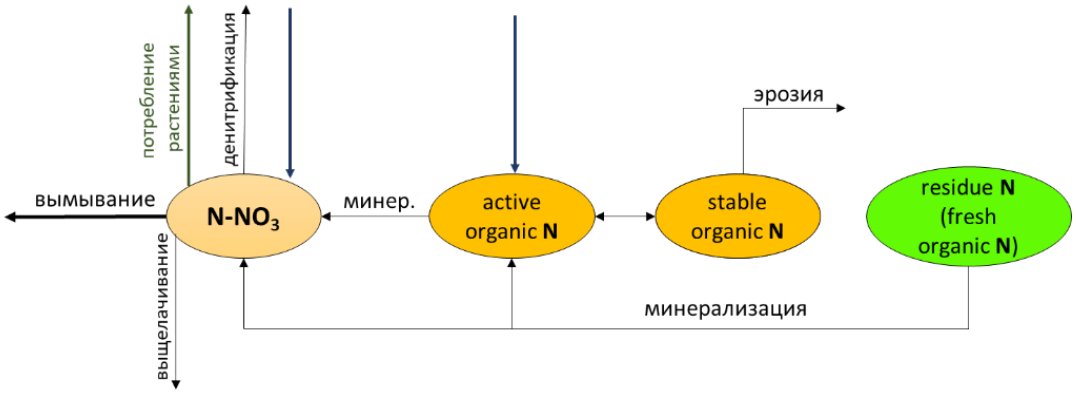


Рис. 3.2. Трехуровневая схема дезагрегирования речного бассейна «бассейн – суббассейн – гидротоп», реализованная в SWIM (источник [127])

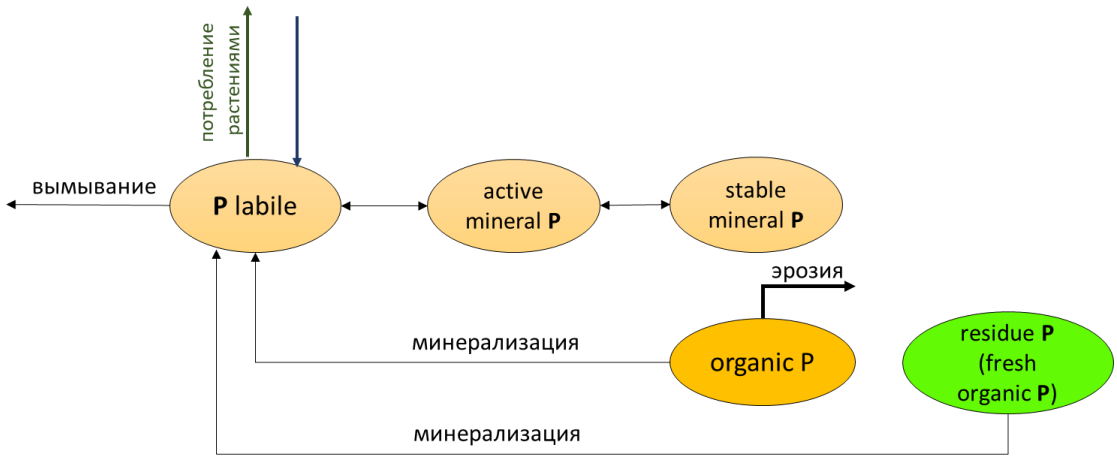
SWIM состоит из четырех модулей: гидрологического, динамики биогенов, роста растительности и транспорта наносов [127]. Моделируемая *гидрологическая* система состоит из четырех слоев: поверхностного слоя почвы, корневой зоны растений (0-2 м), неглубокого слоя грунтовых вод и глубокого слоя подземных вод. В гидрологическом блоке учитываются следующие процессы: выпадение осадков, накопление и таяние снега, формирование поверхностного стока, эвапотранспирация, просачивание осадков в почву и формирование подповерхностного стока, капиллярный подъем, боковой приток и формирование стока подземных вод.

Комплекс процессов, происходящих в почве с азотом и фосфором, сводится к перемещению веществ между пулами. Модуль *динамики биогенов* включает четыре азотных пула (нитратный азот (N-NO3), активный (active organic N) и стабильный (stable organic N) органический азот, свежий органический азот растительных остатков (fresh organic N)) и пять пулов фосфора (подвижный минеральный фосфор (P labile), активный (active mineral P) и стабильный (stable mineral P) минеральный фосфор, органический фосфор (organic P) и фосфор растительных остатков (fresh organic P)) (рис. 3.3). Учитывается внесение азота и фосфора с удобрениями и

моделируются следующие процессы: растительное поглощение биогенов, их минерализация, денитрификация (для N), сорбция/десорбция (для P), транспорт поверхностным и подземным стоком, выщелачивание (для N) в грунтовые воды и потеря с эрозией (в основном для P). Нитратный азот (N-NO3) и растворимый минеральный фосфор (P labile) рассматриваются в модели как консервативные [128].



а



б

Рис. 3.3. Схема блоков и потоков азота (а) и фосфора (б), реализованных в SWIM (источник [127])

Модель минерализации азота SWIM является модификацией модели минерализации PAPRAN [129]. Источником активного (легко минерализуемого) (active organic N) и стабильного (stable organic N) органического азота является почвенный гумус. Поток органического азота между этими двумя пулами регулируется уравнением равновесия. Минерализуются пулы active organic N и fresh organic N,

связанный с растительными остатками. Минерализация пула active organic N зависит от температуры почвы и влажности. Минерализация/иммобилизация пула fresh organic N является функцией отношений C:N и C:P, температуры почвы и содержания в ней влаги. Поток минерализованного из растительных остатков азота распределяется между пулами нитратного азота N-NO3 (80%) и active organic N (20%) (рис. 3.3).

Модель минерализации органического фосфора структурно аналогична модели минерализации азота. Для поддержания баланса фосфора в конце каждого дня количество минерализованного фосфора из гумусового пула organic P вычитается из него и добавляется в пул минерального фосфора; преобразованный фосфор растительных остатков распределяется между пулами organic P (20%) и P labile (80%).

Сорбция/адсорбция минерального фосфора происходит в соответствии со следующей схемой. Минеральный фосфор распределяется между тремя пулами: подвижный фосфор (P labile), активный (active mineral P) и стабильный (stable mineral P) минеральный фосфор. Поток минерального фосфора между пулами active mineral P и stable mineral P регулируется уравнением равновесия, в предположении, что пул stable mineral P в четыре раза больше. Поток фосфора между пулами active mineral P и P labile регулируется уравнением равновесия, предполагающим их равное распределение.

Денитрификация, как один из микробных процессов, является функцией температуры и содержание воды, происходит только в условиях дефицита кислорода, что обычно имеет место при влажной почве. Скорость денитрификации оценивается как функция влажности и температуры почвы, органического вещества, коэффициента влажности почвы и содержания минерального азота.

Модуль *роста растительности* включает уникальные значения параметров для более чем 70 типов сельскохозяйственных культур (пшеница, ячмень, кукуруза, люцерна, картофель и др.) и естественной растительности («трава», «пастбище», «лес» и др.), которые были получены в различных полевых исследованиях. В модели используется концепция фенологического развития сельскохозяйственных культур, учитывающая такие параметры, как: соотношение биомассы и энергии, индекс урожая, базовая и оптимальная температура для роста растений, максимальный индекс площади листа (Leaf Area Index - LAI), доля периода вегетации, когда

LAI снижается, максимальная глубина корней, потенциальные единицы тепла, необходимые для созревания урожая и др.

Потребление азота и фосфора растениями оценивается с использованием подхода «спрос-предложение». Для каждой культуры в базе данных указаны шесть параметров: нормальные доли азота и фосфора в биомассе растений без всходов семян, при 0,5 зрелости, при созревании. Затем рассчитываются оптимальные концентрации азота и фосфора в культуре как функции стадии роста. Суточная потребность сельскохозяйственных культур в питательных веществах оценивается как продукт роста биомассы и оптимальной концентрации в растениях. Фактическое поглощение азота и фосфора составляет минимум спроса и предложения. Растение поглощает питательные вещества из любого почвенного слоя, в котором расположены корни. Поглощение начинается с верхнего слоя и продолжается вниз, пока суточный спрос не будет удовлетворен или пока все питательные вещества не будут исчерпаны. В модели предусмотрена возможность корректировки чистой продуктивности фотосинтеза, в том числе с учетом соотношения содержания CO_2 в атмосфере и температуры воздуха.

Почти также, как и в SWAT, *вынос наносов* для каждого суббассейна рассчитывается с помощью модифицированного универсального уравнения почвенной эрозии (Modified USLE) [130]. Отличие состоит в том, что поверхностный сток, коэффициент эродируемости почвы (или индекс смываемости) K и хозяйственно-агрономический фактор (cropping-management factor) C рассчитываются для каждого гидротопа, а затем усредняются для суббассейна.

В отличие от SWAT, использующей для маршрутизации воды метод ROTO, в SWIM реализуется новая процедура, основанная на методе Muskingum [131]. В последние годы в SWIM было добавлено несколько расширений: для процессов на водно-болотных угодьях [132], роста лесов [133] и динамики углерода в почве [134].

В [135] описан успешный опыт использования SWIM для оценки последствий социально-экономических и климатических изменений на речную систему всего бассейна реки Эльбы площадью ~150000 км^2. Анализ 19-ти климатических сценариев (ENSEMBLES climate scenarios) показал среднее повышение температуры (+3^{o}C) и осадков (+57 мм) в регионе до конца столетия, что привело к изменениям в речном стоке (+20%) и биогенной нагрузке (NO_3-N: –5%; NH_4-N: –

24%; PO_4-P: +5%). В работе в SWIM был добавлен новый модуль процессов потребления биогенных веществ и кислорода, а также роста водорослей внутри речного потока. Результаты расчетов показали снижение биомассы фитопланктона (–4%) и содержания растворенного в воде кислорода (–5%) до конца столетия. Также было исследовано влияние некоторых изменений в землепользовании и управлении биогенными веществами с целью снижения их поступления в речную сеть.

HYPE (*HYdrologic Predictions in the Environment*) - динамическая, полураспределенная, физически обоснованная модель, с непрерывным шагом моделирования во времени. Модель описывает процессы формирования водного стока и связанного с ним стока биогенных веществ (азота и фосфора) в пределах водосбора, их трансформацию в реках и озерах [136].

Модель разрабатывалась в период 2005–2007 гг. в SMHI (Шведском институте гидрологии и метеорологии) для условий окружающей среды Швеции. Отправной точкой был опыт применения HBV [137, 138]; HBV-NP [139, 140], и соответственно части модели HYPE основаны на этих моделях. При разработке новой модели большое внимание было уделено созданию гибкой системы моделирования, в которой можно разрабатывать и тестировать различные гидрологические модели, а также разработке и применению модели водного баланса в рамках этой системы для всей Швеции. Система моделирования была написана на FORTRAN95 и названа HYSS (*HYdrological Simulation System*). Ряд различных процедур для оптимизации и анализа чувствительности, например, моделирование по методу Монте-Карло были включены в систему [141]. Весь моделирующий комплекс получил название HYSS-HYPE. Гибкая система моделирования, наличие альтернативных встроенных моделей для основных составляющих водного, химического баланса и процессов транспорта воды и химических веществ, простой формат входных файлов и открытость кода относятся к преимуществам модели. Например, для расчета процессов испарения в комплексе предусмотрено пять различных моделей.

При использовании HYPE область моделирования делится на суббассейны с произвольной степенью детальности, которые могут быть независимыми или связанными реками и региональным потоком подземных вод. Каждый суббассейн, в свою очередь, делится на классы, которые соответствуют HRU - Flügel, использующимся в

модели HBV. Классы задаются в виде доли площади для каждого подбассейна [142].

В модели выделяют классы земли и классы рек/озер. Классы земли – это различные комбинации типов почвы, землепользования и высоты рельефа местности. Используется разделение на три типа почв (например, глинистые почвы, грубые почвы и пахотные почвы) и десять типов землепользования. По вертикали почва делится на один (в лесах) – три (в сельскохозяйственных районах) слоя, которые могут иметь разную глубину. Площадь, занятая сельскохозяйственной культурой постоянна в течение периода моделирования (севооборот не моделируется). Классы земель с различными высотами используются для учета температурных и условий формирования снежного покрова в пределах суббассейна.

Реки и озера подразделяют на два класса – внутренние/локальные и главные реки и озера. Внутренние реки и озера получают только локальный сток из суббассейнов. Главные реки и озера соединяют между собой суббассейны и принимают локальный сток (после его прохождения через внутренние реки и озера) и речной сток из суббассейнов, расположенных выше по течению. Главные озера располагаются непосредственно на главной реке водосбора. Площадь озер (в отличие от площади поверхности рек) учитывается при расчетах осадков, выпадающих непосредственно на акваторию, и испарения.

Входными метеорологическими данными являются среднесуточные значения температуры и количества осадков в каждом подбассейне, в пределах которого моделируются формирование и таяние снежного покрова, промерзание и оттаивание почвы, инфильтрация, испарение и эвапотранспирация, движение воды по поверхности и в различных почвенных горизонтах, движение грунтовых вод и региональный поток подземных вод, уровень грунтовых вод и воды в озерах. Образующийся в пределах суббассейна водный сток, поступает вначале во внутреннюю речную сеть, а затем – в сеть главных русел. Обе речные сети имеют независимые друг от друга параметры.

Транспорт биогенных веществ на водосборе происходит вместе с водным стоком и делится на группы процессов, связанных: с поступлением азота и фосфора в составе минеральных и органических удобрений, потреблением растениями, трансформацией в почвенном

покрове, выносом со взвешенными веществами и водным стоком, и преобразованиями в процессе транспорта по речной/озерной сети.

Пулы и процессы трансформации биогенных веществ в модели HYPE с небольшими упрощениями аналогичны таковым в моделях SOIL-N [78], ANIMO [143] и ICECREAM [144]. В верхнем почвенном слое выделяют неподвижные и подвижные пулы азота и фосфора. Водный сток транспортирует биогенные вещества из подвижных пулов.

Для азота моделируются два неподвижных пула органического азота (slowN и fastN) и два подвижных пула: неорганического (IN) и органического азота (ON). Пул slowN представляет собой органический азот в почве (в составе гумуса) с длительным временем разложения. В результате разложения органический азот из пула slowN поступает в пул fastN с более коротким временем круговорота. Азот из пула fastN минерализуется и переводится в пул неорганического азота IN. Весь азот в пуле IN является мобильным, растворимым, частично поглощается растениями, частично денитрифицируется, а также транспортируется между слоями почвы или вне профиля с горизонтальным и боковым потоками воды. Из пула fastN органический азот также может поступать в почвенный раствор; этот массоперенос ограничен равновесной концентрацией между содержанием ON в почвенном растворе и в пуле fastN.

Для фосфора моделируются пулы: два неподвижных органического фосфора (slowP и fastP) и два подвижных – растворимого неорганического фосфора (SP) и взвешенного фосфора, адсорбированного на минеральных частицах почвогрунта (partP). Перенос фосфора между пулами slowP и fastP и fastP и SP аналогичен преобразованиям азота, перенос фосфора между пулами SP и partP регулируется процессами адсорбции и десорбции. Переход между пулами SP и partP регулируется разницей между концентрацией SP в почвенном растворе и равновесной концентрацией, рассчитанной с использованием модифицированной изотермы сорбции Фрейндлиха [136].

Предполагается, что в результате эрозии почвы происходит поступление в водные объекты почвенных частиц PP, содержащих минеральный фосфор из пула partP и органический фосфор из пула slowP. Модельное представление эрозии учитывает процесс отрыва частиц и их транспорт. Отрыв моделируется с использованием модели Моргана – Моргана – Финнея [145], частично переработанной для

соответствия временному шагу HYPE. Частицы отделяются с поверхности почвы одним из механизмов: отрыв дождевыми каплями или за счет абразивной способности поверхностного стока. Дождевая эрозия зависит от количества и интенсивности выпадающих осадков, эродируемости почвы и степени ее покрытия растительностью. Плоскостной смыв зависит от величины локального поверхностного стока, уклона подбассейна, свойств почвы (ее плотности и порозности, размываемости/сцепления), покрытия различными типами растительности.

Азот и фосфор, поступающие с водосбора в реки и озера, подвержены влиянию нескольких процессов, изменяющих их количество и форму в водных объектах. Процессы, описываемые в модели: седиментация (осаждение), ресуспендирование/взмучивание, производство первичной продукции, минерализация и денитрификация (для IN). Предполагается полное смешение воды в озерах на каждом временном шаге. В озере органический азот ON и взвешенный фосфор partP удаляются из объема воды в результате осаждения, количество биогенных веществ, удаленных на каждом временном шаге, зависит от их содержания в озере. Предполагается, что ни одно из осажденных веществ в озерах не будет ресуспендировано. В реках твердые partP перераспределяются с течением времени посредством процессов седиментации и ресуспендирования. На процессы влияют расход воды в реке, глубина и площадь дна речного русла. Направленность процессов производства первичной продукции/минерализации определяется температурой воды и ее текущим изменением, средней общей концентрацией биогенов. Процесс активен в полном объеме реки и только до определенной глубины в озерах. Предполагается, что адсорбция/десорбция фосфора также включена в это превращение. Денитрификация рассчитывается в зависимости от температуры воды, концентрации IN в водоеме и площади поверхности озера или реки.

В [146] модель HYPE впервые применена на территории России для исследования формирования стока фосфора в бассейне верхней р. Москвы (выше Можайского водохранилища). Расчеты показали, что модель HYPE хорошо воспроизводит ежедневные расходы воды в замыкающем створе водосбора (р. Москва - дер. Барсуки), и удовлетворительно величины годового и сезонного биогенного стока. По результатам моделирования определено, что отмена внесения удобрений приведет к снижению сезонного стока фосфора на 5-12%,

годового стока валового фосфора на 7-8%. Установлено, что в генетической структуре стока валового фосфора 60-80% составляет почвенный сток. Склоновая и грунтовая составляющие оказались сопоставимы по величине. Построены карты модулей выноса растворенного и валового фосфора с суббассейнов в различные сезоны года и в различные по водности годы.

Одной из первых отечественных моделей формирования стока и качества воды на речном водосборе является модель **ECOMAG-HM** (*ECOlogical Model for Applied Geophysics - Heavy Metals*) динамическая пространственно распределенная физически обоснованная модель с непрерывным шагом, моделирующая формирование содержание тяжелых металлов (консервативных загрязняющих веществ). Модель состоит из двух основных блоков: гидрологической и гидрохимической моделей.

Начальная версия гидрологической модели была разработана в Институте водных проблем РАН в 1992 г. [34]. Во второй половине 1990-х годов проходило интенсивное совершенствование модели: проведены комплексные испытания разработанных алгоритмов по учету пространственных неоднородностей в процессах формирования стока; разрабатывалась прикладная моделирующая система, включающая технологическое и информационное обеспечение математической модели; разрабатывался гидрохимический блок модели.

В настоящее время модель ECOMAG-HM является составной частью Информационно-моделирующего комплекса (ИМК) ECOMAG, в который входят: гидрологический и гидрохимический расчетные модули, тематические цифровые электронные карты различных масштабов, цифровые модели рельефа (ЦМР) различного пространственного разрешения, технология разбиения водосборной площади на элементарные водосборы и схематизации речной сети, базы данных характеристик подстилающей поверхности, базы данных гидрометеорологической информации, средства управления базами данных и геоинформационной обработки пространственной информации и управляющая оболочка с дружественным интерфейсом [147].

В соответствии с базовой архитектурой модели вся территория речного бассейна разбивается нерегулярной сеткой на отдельные расчетные элементы - элементарные водосборы с учетом особенностей рельефа и структуры речной сети [148]. Процессы в пределах каждого

расчетного элементарного водосбора описываются системой дифференциальных уравнений, большая часть которых получена путем интегрирования по пространству базисных уравнений детальных физико-математических моделей, либо привлечением иных упрощенных схем описания процессов, разумных в принятых пространственно-временных масштабах. В пределах каждого элементарного водосбора гидрологические и гидрохимические процессы моделируются для четырех уровней (рис. 3.4): для поверхностного слоя почвы (горизонта А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонта В), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период добавляется емкость снежного покрова.

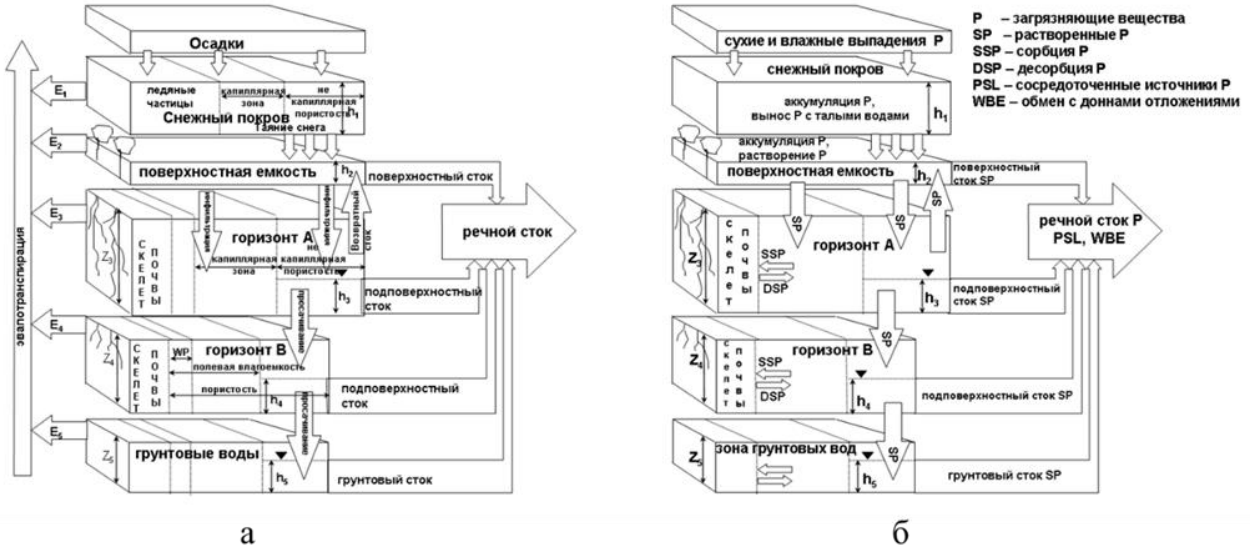


Рис. 3.4. Структура гидрологического (а) и гидрохимического (б) блоков модели ECOMAG-HM

Гидрологическая модель описывает процессы гидрологического цикла по следующей схеме (рис. 3.4а). В летний период выпадающие жидкие осадки частично перехватываются растительностью, частично попадают на поверхность почвы, инфильтруются и проникают в более глубокие почвенные слои. Общая пористость почвы делится на две части: капиллярную и некапиллярную зоны. Избыток влаги, не поглощенной почвой, после заполнения поверхностных депрессий перемещается по уклону земной поверхности в речную сеть (поверхностный сток). Из капиллярной зоны вода теряется только за счет эвапотранспирации. Предполагается, что в условиях высокого содержания влаги в почве фактическая эвапотранспирация равна

потенциальному испарению, а затем линейно уменьшается до нуля при влажности почвы, равной точке завядания [149]. Потенциальное испарение оценивается по формулам Дальтона с использованием данных о температуре и влажности воздуха. Часть воды, впитавшейся в почву, перемещается по уклону в речную сеть по относительно непроницаемым водоупорам. Другая часть воды проникает в зону подземных вод и участвует в формировании базисного стока. Подповерхностный и подземный сток описываются уравнением Дарси, а поверхностный и речной сток - уравнением кинематической волны. В холодные периоды года схему дополняют гидротермические процессы: формирования снежного покрова и снеготаяния, промерзания и оттаивания почвы, инфильтрации незамерзшей воды в мерзлый грунт. Фазовый состав осадков определяется среднесуточной температурой воздуха и пороговой температурой. Скорость таяния снега рассчитывается методом градусо-дней [150].

Гидрологическая модель ECOMAG была протестирована на речных бассейнах в России, Норвегии, Швеции, Франции и Канаде, расположенных в разных физико-географических зонах с различными условиями формирования стока, типами питания и гидрологического режима водных объектов [34, 148, 151-153].

Гидрохимическая модель описывает процессы миграции и трансформации консервативных ЗВ в речном бассейне с учетом следующих процессов (рис. 3.4б). ЗВ могут поступать в водные объекты из источников, расположенных на поверхности земли, внутри почвы или в зоне грунтовых вод, а также выпадать на поверхность земли из атмосферы в виде влажных и сухих осаждений. Во время осадков и таяния снега ЗВ на поверхности земли частично растворяются в дождевой или талой воде. Процесс растворения ЗВ жидкими осадками и талыми водами описывается линейной зависимостью потока растворенного вещества от разности максимально возможной и текущей концентрации в потоке. Часть растворенных веществ удаляется с поверхностным стоком. Скорость поступления растворенных ЗВ в поверхностный поток рассчитывается как линейная функция от разности их концентраций в почве и в потоке. Другая часть растворенных ЗВ проникает в почву с просачивающейся водой. В почве происходит взаимодействие между почвенным раствором и твердой фазой почвы. ЗВ из почвенного раствора могут сорбироваться твердыми частицами почвенной матрицы или поступать в почвенный раствор с твердых частиц. Процесс сорбции-

десорбции химических веществ почвой описан линейной изотермой сорбции Фрейндлиха, которая предполагает, что характерное время переноса вещества потоком намного больше характерного времени сорбции, и устанавливает связь между количеством сорбированного вещества и его концентрацией в растворе. Предполагается мгновенное и полное перемешивание веществ в растворе.

Режим растворенных ЗВ в речном бассейне зависит от интенсивности гидрологических процессов. Поэтому, гидрологические характеристики, определяемые в гидрологической модели, используются как входы для гидрохимической модели. ЗВ переносятся поверхностным, подповерхностным, грунтовым и речным стоком с элементарных водосборов в речную сеть. В модели также учитываются: поступление ЗВ от точечных источников – выпусков сточных вод; обмен ЗВ в речном русле между водным потоком и донными отложениями. Уравнения, алгоритмы и результаты испытания этого блока модели описаны в работах [150, 154, 155].

В работах [150, 156] была проведена верификация модели ECOMAG-НМ для двух небольших речных бассейнов на северо-западе Кольского полуострова, подверженных интенсивному загрязнению никелем предприятиями комбината Печенганикель, и на протяжении многих лет являющихся одними из самых загрязненных тяжелыми металлами в России. В этих работах впервые сделана попытка оценить вклад различных антропогенных составляющих в загрязнение речных вод никелем: непосредственные сбросы в речную сеть, выбросы в атмосферу и осаждение на земную поверхность, загрязнение почвенно-грунтовой толщи за длительный период работы комбината. В работах [154, 155] модель верифицирована на примере крупного речного бассейна Нижнекамского водохранилища, в водотоках которого отмечаются высокие концентрации тяжелых металлов.

Контрольные вопросы и задания к главе 3

1. Какие модели относятся к категории водосборных моделей формирования качества воды?

2. Из какого количества блоков обычно состоят водосборные модели формирования качества воды? Какой блок в модели является основным?

3. Почему при моделировании формирования качества воды необходимо учитывать эрозию почвы? Какие факторы учитываются в моделях почвенной эрозии?

4. Какие характеристики растений и процессы их жизнедеятельности учитываются в блоке роста растительности?

5. Выберите из перечисленных модели с непрерывным (суточным) шагом моделирования:

а) AGNPS,
б) HSPF,
в) SMART,
г) SWMM,
д) SWAT.

6. Какие модели качества воды называются универсальными?

7. Установите соответствие между названием модели и страной, в которой она была разработана:

а) ECOMAG-HM	1) США;
б) INCA	2) Швеция;
в) SWMM	3) Нидерланды;
г) ANIMO	4) Великобритания (UK);
д) SOIL-N	5) Германия;
е) SWIM	6) Россия

8. Перечислите 6 моделей формирования качества воды, разработанных Министерством сельского хозяйства США.

9. Какая модель качества воды была разработана Гидрологическим инженерным центром корпуса инженеров армии США?

10. Что такое «единица гидрологического отклика»? Чем она отличается от элементарного водосбора?

11. Для каких уровней в пределах каждого элементарного водосбора моделируются гидрологические и гидрохимические процессы в модели ECOMAG-HM?

12. В какой модели формирования качества воды реки и озера подразделяются на два класса?

Список литературы

1. ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам. 1988. 34 с.
2. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 308 с.
3. ГОСТ 17.1.1.01-77 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения (с Изменениями N 1, 2).
4. МУ 2.1.5.720-98 Обоснование гигиенических нормативов химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно бытового водопользования.
5. ГОСТ 27065-86 Качество вод. Термины и определения.
6. СП 32.13330.2012 Свод правил. Канализация. Наружные сети и сооружения (Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85).
7. ИТС 22.1-2016. Общие принципы производственного экологического контроля и его метрологического обеспечения.
8. ISO 11074-1:1996 Soil quality – Vocabulary – Part 1: Terms and definitions relating to the protection and pollution of the soil.
9. Приказ Росгидромета от 31.10.2000 N 156 «О введении в действие порядка подготовки и представления информации общего назначения о загрязнении окружающей природной среды (с изменениями на 30 декабря 2015 года)».
10. Р 52.24.756-2011 Рекомендации. Критерии оценки опасности токсического загрязнения поверхностных вод суши при чрезвычайных ситуациях (в случаях загрязнения).
11. Шабанов В. В., Маркин В. Н. Ведение мониторинга водных объектов в современных условиях: монография. М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. 150 с.
12. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды. М.: Наука, 2010. 286 с.
13. Черняев А.М. Управление водными ресурсами в агропромышленном регионе (Урал и Приуралье). Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 248 с.
14. Майстренко В.Н., Хамитов Р.З., Будников Г.К. Эколого-аналитический мониторинг суперэкотоксикантов. М.: Химия, 1996. 319 с.

15. Республика Башкортостан // Башкортостан: Краткая энциклопедия. Уфа: Научное издательство «Башкирская энциклопедия», 1996.

16. Раткович Л.Д., Маркин В.Н., Глазунова И.В., Соколова С.А. Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты // Природообустройство. 2016. № 3. С. 64-75.

17. Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В. и др. Агроэкология / Под ред. В.А. Черникова, А.И. Чекереса. М.: Колос, 2000. 536 с.

18. Иванов А.Л., Свинцов И.П., Барабанов А.Т. и др. Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации на период до 2020 года / Ред. К.Н. Кулик. Волгоград: ВНИИ агролесомелиорации, 2008. 33 с.

19. Государственный доклад о состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2016 году. М., 2017.

20. Кузник И.А. Агромелиоративные мероприятия, весенний сток и эрозия почв. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 220 с.

21. Королев М.В., Власов А.Н., Остякова А.В., Лупанова И.А. Угличское водохранилище. Переработка берегов. Мониторинг. Геомеханические исследования М.: ИПРИМ РАН: ООО «СамПолиграфист», 2017. 308 с.

22. Постановление Правительства РФ «Об утверждении положения о государственном мониторинге состояния и загрязнения окружающей среды» (от 06.06.2013 г. № 477) // Интернет-ресурс https://base.garant.ru/70393142/

23. Постановление Правительства РФ «Об утверждении положения о государственном экологическом мониторинге (государственном мониторинге окружающей среды) и государственном фонде данных государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды)» (от 09.08.2013 г. № 681) // Интернет-ресурс https://base.garant.ru/70393142/

24. РД 52.24.309–2016. Руководящий документ. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону: ФГБУ ГХИ, 2016. 104 с.

25. ГОСТ 17.1.3.07-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. М.: Изд-во стандартов, 1986.

26. Постановление Правительства РФ «Об утверждении положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов» от 10.04.2007 № 219 (с изменениями от 22 апреля, 7 октября 2009 г.).

27. Мотовилов Ю.Г., Фащевская Т.Б. Пространственно распределенная модель формирования стока тяжелых металлов в речном бассейне // Вода: химия и экология. 2018. №1-3. С. 18-31.

28. Кирпичникова Н.В. Изменение гидрохимического режима водохранилища / В кн. «Иваньковское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны». М.: Наука, 2000. С. 62-98.

29. Dressing, S. A., Meals D. W., Harcum J. B., Spooner J., Stribling J. B., Richards R. P., Millard C. J., Lanberg S.A., and O'Donnell J. G. Monitoring and Evaluating Nonpoint Source Water-shed Projects, EPA, 2016. Интернет-ресурс URL: https://www.epa.gov/polluted-runoff-nonpoint-source-pollution/monitoring-and-evaluating-nonpoint-source-watershed.

30. Гордин И.В., Кирпичникова Н.В., Куприянова Е.И., Харитонов В.А. Мониторинг застройки водоохранных зон // Сб. докладов научно-практич. конф. «Водоохранные зоны: опыт практического применения и целесообразность развития». М., 2006. С.45-49.

31. Bedient, P.B., Lambert, J.L., and Springer, N.K., 1980. Stormwater pollutant load runoff relationships. Journal Water Pollution Control Federation, 52 (9), 2396–2404.

32. Knisel W.G., ed., 1980. CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems / USDA: Conservation research report No. 26. Washington: Dept. of Agriculture, Science and Education Administration. 643 p.

33. Krysanova V. Water Quality Modelling In Mesoscale And Large River Basins / V. Krysanova, F. Hattermann, S. Huang, C. Hesse A. Voß // Hydrolgical systems modeling. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). 2009. V. 2. P. 11-48.

34. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.

35. Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 1970. 240 с.

36. Сурмач Г.П. Опыт расчета смыва почв для построения комплекса противоэрозионных мероприятий // Почвоведение. – 1979. – №4. – С. 92–104.

37. Сухановский Ю.П. Вероятностный подход к прогнозу дождевого смыва почвы. – Курск: НТБ ВНИИЗиЗПЭ, 1983. – Вып.3 (38)–83 – С. 3–9.

38. Сухановский Ю.П. Имитационная модель дождевой эрозии почвы. Доклады ВАСХНИЛ, N 1, 1991. С. 55-60.

39. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. С-Пб.: Гидрометеоиздат, 1993. 278 с.

40. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противоэрозионных мероприятий на европейской территории СССР Л.: Гидрометиздат, 1979. С. 62.

41. Beasley D.B., Huggins L.F. ANSWERS - user's manual. -USEPA, 1981.p. 54.

42. Blau J.B., Woolhiser D.A., Lane L.J. Identification of erosion model parameters. TransP of the ASAE, 1988. v 31, n 3, p. 839-845, 854.

43. Foster G.B., Meyer L.D. Mathematical simulation, of upland erosion by fundamental erosion mechanics.In "Present and perspective technology for predicting sediment yelds and sources". USDA.ARS-S-40, 1975. p. 190-206.

44. Hirshi M.C., Barfield B.J. KYEPMO - A physically based research erosion model -ASAE, St.Joseph,Mich., 1986. Paper N 86-2047. p. 34.

45. KhanbiIvardi P. M., Rogowaki A.S. Mathematical model of erosion and deposition on a watershed. Trans. of the ASAE, 1984. v 27, n 1, P.73-79.

46. Kibler D.F. and D.A. Wolhiser. 1970. The kinematic caskade as a hydrologic model.Hydrology Papers.Colorado States University. Fort Coll ins,Colorado. No 39. p.27.

47. Lighthill M.J. and Whitham C.B. 1955. On Kinematic Waves. I. Flood Movement in Long Rivers.Proc.of the Poyal Society of London, Series A,Vol. 229, p. 69-76.

48. Onstad C.A., Foster G.R. Erosion modeling on a watershed. Trans. of the ASAE, 1975. v18, n2, p.288-293.

49. Onstad C-A., Otterby M.A. Estimating the effects of cropping, tillage and erosion control practices over large areas. Trans. of the ASAE, 1982.v 25, n 1, p.111-115.

50. Park S.W., Mitchel 1 J.K., Scarborough J.N. Soil erosion simulatic on small watersheds: a modified ANSWERS model. Trans. of the ASAE,1982. v 25, n 6, p. 1581-1588.

51. Pierre Y., Macel P. Modeling of rainfall erosion // J. Hydraul. Eng. 1985. V. 111. No. 10. P. 1344–1359.

52. Williams J.R., Renard K.C., Dyke P.T. EPIC - A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. - J. of Soil and Water Conservation Sep. -Oct. 1983. p. 381-383.

53. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Handbook No. 537. Washington, 1978. 58 p.

54. Maidment D.R. (ed.) Handbook of Hydrology. – NY: McGrow-Hill Inc., 1992.

55. Эрозия почв. – М.: Колос, 1984. – 416 с.

56. Foster G.B., Meyer L.D., Onstad C.A. A runoff erosivity factor and variable slope exponents for soil loss estimates. Trans. of the ASAE. 1977a. V. 20. No. 4. P. 683–687.

57. Foster G.B., Meyer L.D., Onstad C.A. An erosion equation derived from basic erosion principles. Trans. of the ASAE, 1977b. V. 20, No. 4. P. 678–682.

58. Foster G.B., Wichmeier W.H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. Trans. of the ASAE. 1974. V. 17. No. 2. P. 305–309.

59. Kuh Hsien-chien, Reddel1 D.L., Hiller E.A. Two-dimensional model of erossion from a watershed. St. Joseph Mich. Paper Amer. Soc. of agric. Engineers. 1976. No. 76 (2539). 26 p.

60. Motovilov Ju.G. Modelling the effects of agrotechnical measures on spring runoff and water erosion // IANS Publ., N 166, 1987. p. 241–251.

61. Williams J.R. Predicting sediment yield frequency for rural basins to determine man’s effect on long-term sedimentation // IAHS-AISH Publ. 1974. No. 113. P. l05–l08.

62. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур / Под редакцией Ф.В.Т. Пеннинга, де Фриза и Х.Х. Аапра. – Л. Гидрометеоиздат, 1986. 320 с.

63. Monsi M. and Saeki T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion // Jap. J. Bot., 1953. Vol. 14. N 1. P. 22-52.

64. Saeki T., Kuroiwa S. On the establishment of the vertical distribution of photosynthetic system in a plant community // Bot. Mag. Tokyo, 1959. V. 72. No. 848. P. 27–35.

65. Gaastra P. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance. Mededel. Landbouwhogeschool, Wageningen, 1959. V. 59, No. 13. P. 1–68.

66. De Wit C. T. Potential photosynthesis of crop surfaces – Neherlands J. Agric. Sci., 1959. vol.7, N 1, p. 141–149.

67. Davidson J.L., Philip J.R. Light and pasture growth. Climatology and Microclimatology, UNESCO, 1958. P. 181–187.

68. Hiroi T., Monsi M. Dry matter economy of Helianthus annuus communities grown at varying densities and light intensities. J. Faculty Sci. Univ. Tokyo, 1966. V. 3, No. 9. P. 241–285.

69. Будаговский А.И., Ничипорович А.А., Росс Ю.К. Количественная теория фотосинтеза и ее использование для решения научных и практических задач физической географии // Изв. АН СССР, серия: география. – 1964. – №6. – С.13–27.

70. Будаговский А.И., Росс Ю.К. Основы количественной теории фотосинтетической деятельности посевов // В кн.: «Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности». – М.: Наука, 1966. – С. 51–58.

71. Росс Ю.К. К математической теории фотосинтеза растительного покрова. – Доклады АН СССР, 1964. – Т. 157, №5. – С. 1239–1242.

72. Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – С. 217.

73. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 168 с.

74. Molina J.A.E., Clapp C.E., Shaffer M.J., Chichester F.W. and Larson W.E. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil: Description, calibration and behavior. Soil Sci. Soc. Am. J., 1983, 47. P. 85–91.

75. Cabrera M., Molina J.A., Vigil M. Modeling the Nitrogen Cycle // Nitrogen in Agricultural Systems, Agronomy Monograph 49. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2008. P. 695–730.

76. Verberne E.L.J., Yassink J., De Willigen P., Groot J.J.R., van Veen J.A. Modelling organic matter dynamics in different soils. Neth. J. Agric. Sci. 1990. 38. P. 221–238.

77. McGill W.B., Hunt H.W., Woodmansee R.G., Reuss J.O. 1981. Phoenix: A model of the dynamics of carbon and nitrogen in grassland soils // F.E. Clark and R. Rosswall (eds.) Terrestrial nitrogen cycles. Ecol. Bull. (Stockholm) 33: 49–115.

78. Johnsson H., Bergström L., Jansson, P.-E., Paustian K. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil // Agric. Ecosyst. Environ. 1987. 18. P. 333–356.

79. Li C., Florking S., Froling T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: Model structure and sensitivity // J. Geophys. Res. 1992. 97. P. 9759–9776.

80. Smith R.V., Doyle R.M., Burns L.C., Stevens R.J. A model for nitrite accumulation in soils // Soil Biol. Biochem. 1997. 29. P. 1241–1247.

81. Van Veen J.A., Frissel M.J. Simulation model of the behavior of N in soil // M.J. Frissel, J.A. Van Veen (eds.) Simulation of nitrogen behavior in soil plant systems. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, The Netherlands. 1981. P. 126–144.

82. Трофимов С.Я., Лазарев А.С., Фокин А.Д. Минерализация лабильных фрагментов органического вещества гумусово-аккумулятивного горизонта дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. – 2012. – №12. – С. 1259–1268.

83. Ларионова А.А., Котева Ж.В., Розанова Л.Н., Кудеяров В.Н. Влияние азотных удобрений на разложение целлюлозы в зависимости от отношения C/N в почве // Почвоведение. – 1994. – №9. – С. 55–60.

84. Курганова И.Н., В.О. Лопес де Гереню, К. Ван Кессел, Сикс Й. Влияние температуры и влажности на эмиссию N_2O из почв различного землепользования // Агрохимия. – 2009. – №2. – С. 50–59.

85. Разгулин С.М. Минерализация соединений азота в почве березняка-кисличника // Почвоведение. – 2013. – №2. – С. 144–151.

86. Вавилин В.А., Васильев В.Б., Рытов С.В. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов. – М.: Наука, 1993. – 208 с.

87. Мамай А.В. Микробная трансформация соединений азота и углерода в лесных почвах Средней тайги (на примере Карелии). Дис. канд. биол. наук. – М., 2014. – 153 с.

88. Умаров М.М., Кураков А.В., Степанов А.Л. Микробиологическая трансформация азота в почве. – М.: Геос, 2007. – 138 с.

89. 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.

90. Rijtema P.E., Kroes J.G. Some results of nitrogen simulations with the model ANIMO // Fertilizer Research. 1991. 27. P. 189–198.

91. Williams J.R., Jones C.A., Dyke P.T. The EPIC model and its application. Proc. ICRISAT-IBSNAT-SYSS Symp. on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer, March 1983, Hyderabad, India, 1984, pp. 111-121.

92. Leonard R.A., Knisel W.G., Still D.A. GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 1987. V. 30. No. 5. P. 1403–1418.

93. Rekolainen S., Posch M. Adapting the CREAMS Model for Finnish Conditions. Nordic Hydrology. 1993. 24. P. 309–322.

94. Rekolainen S., Gouy V., Francaviglia R. Eklo O.M., Barlund I. Simulation of soil water, bromide and pesticide behaviour in soil with the GLEAMS model // Agricultural Water Management. 2000. 44(1–3). P. 201–224.

95. Leonard R.A., Ferreire V.A. CREAMS2 – The nutrient and pesticide models // Proc. Natural Res. Modeling Symposium. Agricultural Research Service. U.S. Dept. Agriculture, 1984.

96. Simunek J., Vogel T., van Genuchten M.Th. The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media, Version 1.21. Research Report No. 132, 197 p., U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 1994.

97. Mailhol J., Ruelle P., Nemeth I. Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation // Irrigation Science. 2001. 20(3). P. 139–147.

98. Jarvis N.J. 1994. The MACRO model (Version 3.1). Technical description and sample simulations. Reports and Dissert. 19, Dept. Soil Sci., Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala, Sweden, 51 p.

99. Jarvis N.J., Brown C.D., Granitza E., 2000. Sources of error in model predictions of pesticide leaching: a case study using the MACRO model // Agricultural Water Management, 44. P. 247–262.

100. Leistra M., van der Linden A.M.A., Boesten J.J.T.I., Tiktak A., van den Berg F. PEARL model for pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems. Description of processes // Alterra report 13, RIVM report 711401009. Alterra, Wageningen, 2000. 107 p.

101. Carsel R.F., Smith C.N., Mulkey L.A., Dean J.D., Jowise P. 1984. User's manual for the pesticide root zone model (PRZM): Release 1. EPA–600/3–84–109. U.S. EPA, Athens, GA.

102. Alvarez J., Guirao J., Herguedas A. and Atienza J., 1997. Evaluation of the PRZM2 model for transport of metamitron in undisturbed

soil monoliths. Water pollution IV. Modelling, measuring and prediction. Computational Mechanics Publications 1997: 67–74.

103. Eckersten H., Jansson P.-E., 1991. Modelling water flow, nitrogen uptake and production for wheat // Fertilizer Research. 27. P. 313–329.

104. Johnsson, H., Hoffmann M. Nitrogen leaching from agricultural land in Sweden // Ambio. 1998. 27. P. 481–488.

105. Vanclooster M., Viaene P. Diels J., Christiaens K. WAVE: a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Reference and user's manual (release 2.0). Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium. 1995.

106. Vanclooster M., Ducheyne S., Dust M., Vereecken H. Evaluation of pesticide dynamics of the WAVE-model // Agricultural Water Management. 2000. 44(1–3). P. 371–388.

107. Johnsson H., Larsson M., Mårtensson K., Hoffmann M. SOILNDB: a decision support tool for assessing nitrogen leaching losses from arableland // Environmental Modelling & Software. 2002. 17. P. 505–517.

108. Roesner L.A., Nichandros H.M., Shubinski R.P. et al. A model for evaluating runoff-quality in metropolitan master planning // ASCE Urban Water Resources Research Program, Technical Memorandum No. 23 (NTIS PB–234312). NY: ASCE, 1974.

109. Modeling of Nonpoint Source Water Quality in Urban and Non-urban Areas. Report EPA/600/3–91/039 June 1991. 101 p.

110. Storm Water Management Model. V. I. Final Report. Metcalf & Eddy, Inc., University of Florida, and Water Resources Engineers, Inc. / EPA Report 11024DOC07/71, U. S. Environmental Protection Agency, Water Quality Office, Washington, DC, July 1971.

111. Huber W.C., Dickinson R.E. Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual // EPA/600/3–88/001a. Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, October 1992.

112. Rossman L.A. Storm Water Management Model User's Manual. Version 5.0. EPA/600/R–05/040 Revised July 2009. National risk management research Laboratory Office of research and development U.S. Environmental Protection Agency. 297 p.

113. Young R., Onstad C.A., Bosch D.D., Anderson W.P. AGNPS: Agricultural Non-Point Source Pollution Model: a watershed analysis tool.

USDA–Agricultural Research Service, Conservation Research Report 35, USDA, Washington, D.C., 1987.

114. Arheimer B. and Olsson J. Integration and Coupling of Hydrological Models with Water Quality Models: Applications in Europe. Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI). 2002. 53 p.

115. Arheimer B., Brandt M. Modelling nitrogen transport and retention in the catchments of southern Sweden // Ambio. 1998. 27. P. 471–480.

116. Barnwell T.O., Johanson R. HSPF: a comprehensive package for simulation of watershed hydrology and water quality. Nonpoint pollution control – tools and techniques for the future // Proceedings of a Technical Symposium, 1981. P. 135–153.

117. Johanson R.C., Imhoff J.C., Kittle J.L., Donigian A.S. Hydrological Simulation Program – Fortran (HSPF): User's Manual for Release 8 // EPA-600/3–84–066. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, 1984.

118. Whitehead P. G., Wilson E. J., Butterfield D. A semi-distributed integrated flow and nitrogen model for multiple source assessment in catchments (INCA): Part I – Model structure and process equations // Sci. Total Environ. 1998. 210. P. 547–558.

119. Birkinshaw S.J., Ewen J. Nitrogen transformation component for SHETRAN catchment nitrate transport modelling // Journal of Hydrology, Vol. 230, Issues 1–2, 28 April 2000. P. 1–17.

120. Arnold J.G., Allen P.M., Bernhardt G. A comprehensive surface-groundwater flow model // J. Hydrology. 1993. 142. P. 47–69.

121. Arnold J.G., Williams J.R. Srinivasan R., King K.W., Griggs R.H. SWAT, Soil and Water Assessment Tool. USDA, Agriculture Research Service, Temple. 1994. TX 76502.

122. Ambrose R.B., Wool T.A., Barnwell Th.O. Development of Water Quality Modeling in the United States // Environ. Eng. Res. 2009 December, 14(4). P. 200–210. DOI:10.4491/eer.2009.14.4.200

123. Krysanova V., Meiner A., Roosaare J., Vasilyev A. Simulation modelling of the coastal waters pollution from agricultural watershed // Ecological Modelling. 1989. 49. P. 7–29.

124. Krysanova V., Becker A., Klöcking B. 1998a. The linkage between hydrological processes and sediment transport at the river basin scale // W. Summer, E. Klaghover, W. Zhang (eds.) Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes. IAHS Publications. No. 249. P. 13–20.

125. Krysanova V., Müller-Wohlfeil D.-I., Becker A. Development and test of a spatially distributed hydrological water quality model for mesoscale watersheds // Ecological Modelling. 1998b. 106 (1–2). P. 261–289.

126. Flügel W. 1995 Delineating hydrological response units by geographical information-system analyses for regional hydrological modeling using PRMS/MMS in the drainage-basin of the River Brol, Germany // Hydrol. Process. 9. P. 423–436.

127. SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual / Valentina Krysanova, Frank Wechsung Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany in collaboration with Jeff Arnold, Ragavan Srinivasan and Jimmy Williams USDA ARS, Temple, TX, USA. Version: SWIM–8, 2000. 239 p.

128. Williams J.R. SPNM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen from agricultural basins // Water Resources Bull. 1980. 16(5). P. 843–848.

129. Seligman N.G., van Keulen H. PAPRAN. A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen // M.J. Frissel, van Veen J.A. (eds.). Simulation of Nitrogen Behavior of Soil-Plant Systems, Proc. Workshop, January-February 1990. Wageningen, 1991. P. 192–221.

130. Williams J.R., Berndt H.D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology // Trans. ASAE. 1977. 20(6). P. 1100–1104.

131. Maidment D.R. (ed.) Handbook of hydrology. N.Y.: McGraw-Hill, Inc. 1993.

132. Hattermann, F.F., Krysanova V., Habeck A., Bronstert A. 2006. Integrating wetlands and riparian zones in river basin modelling // Ecological Modelling. 199. P. 379–392.

133. Wattenbach M., Hattermann F., Wenig R., Wechsung F., Krysanova V., Badeck F. A simplified approach to implement forest eco-hydrological properties in regional hydrological modeling // Ecological Modelling. 2005. 187. 1. P. 40–59.

134. Post J., Krysanova V., Suckow F., Mirschel W., Rogasik J., Merbach I. Integrated ecohydrological modelling of soil organic matter dynamics for the assessment of environmental change impacts in meso- to macro-scale river basins // Ecological Modelling. 2007. 206. 93–109.

135. Hesse C. & Krysanova V. Modeling Climate and Management Change Impacts on Water Quality and In-Stream Processes in the Elbe River Basin // Water. 2016, 8, 40. 31 p. doi:10.3390/w8020040.

136. Lindström G., Pers Ch., Rosberg J., Strömqvist J., Arheimer B. Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales // Hydrology Research, 2010. No. 3–4 (41). P. 295–319.

137. Bergström, S. 1976 Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Reports RHO, No. 7, Norrköping.

138. Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S. Development and test of the distributed HBV–96 model // J. Hydrol. 1997. 201. P. 272–288.

139. Andersson L., Rosberg J., Pers B.C., Olsson J., Arheimer B. Estimating catchment nutrient flow with the HBV–NP model: sensitivity to input data // Ambio. 2005. 34, p. 521–532.

140. Arheimer B., Löwgren M., Pers B.C., Rosberg J. Integrated catchment modeling for nutrient reduction: scenarios showing impacts, potential and cost of measures // Ambio. 2005. 34, p. 513–520.

141. Pers C., Lindström G., Rosberg J., Arheimer B., Andersson L. 2006 Development of a new distributed hydrological model for large-scale and small-scale applications // Refsgaard J.C. & Höjberg A.L. (eds.). Proc. of the XXIV Nordic Hydrological Conf. NHP Report No. 49. P. 307–314.

142. Pers C. The code of HYSS and HYPE – overview HYSS – Hydrological Simulation System HYPE – Hydrological Predictions for the Environment. Part 1: Introduction to the HYSS and HYPE code. 2014. C. 1–11.

143. Groenendijk P., Kroes J.G. 1999 Modelling the nitrogen and phosphorus leaching to groundwater and surface water with ANIMO 3.5. Winand Staring Centre. Wageningen (The Netherlands), Report 144.

144. Tattari S., Bärlund I., Rekolainen S., Posch M., Siimes K., Thukanen H.-R., Yli-Halla M. Modeling sediment yield and phosphorus transport in Finnish clayey soils. Trans. ASAE 44, 2001. 297–307.

145. Morgan R.P.C. 2001 A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model. Catena 44, 305–322.

146. Ясинский Н.С. Закономерности формирования стока фосфора в верхней части бассейна реки Москвы. Дис. … канд. геогр. наук. М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2019. – 174 с.

147. Мотовилов Ю.Г. Состояние и перспективы гидрологического моделирования речных бассейнов России на основе комплекса ECOMAG / В сб. Фундаментальные проблемы воды и

водных ресурсов: Материалы 3-й Всероссийской конференции с международным участием. – Барнаул, 2010. – С. 530–532.

148. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты испытаний // Водные ресурсы. – 2016. – № 5. – С. 467–475.

149. Feddes R.A., Bresler E., Neuman S.P. (1974) Field test of modified numerical model for water uptake by root systems // Water Resources Research 10(6), 1166–1206.

150. Motovilov Yu. ECOMAG: a distributed model of runoff formation and pollution transformation in river basins / In. Understanding Freshwater Quality Problems in a Changing World. Proceedings of H04, IAHS–IAPSO–IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013 (IAHS Publ. 361, 2013). P. 227–234.

151. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. – Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series no.105, May 1999a. – 88 p.

152. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // Agricultural and Forest Meteorology. – 1999b – Vol. 98 No. 99. – P. 257–277.

153. Motovilov, Y.G., 2017. Modeling fields of river runoff (a case study for the Lena river Basin). Russian Meteorology and Hydrology, 42, 121–128. doi:10.3103/S1068373917020066

154. Мотовилов Ю.Г., Фащевская Т.Б. Пространственно-распределенная модель формирования стока тяжелых металлов в речном бассейне // Вода: химия и экология. – 2018. №1–3. – С. 18–31

155. Motovilov Yu.G., Fashchevskaya T.B. Simulation of spatially-distributed copper pollution in a large river basin using the ECOMAG–HM model // Hydrological Sciences Journal. V. 64. Is. 6. 2019. P. 739–756.

156. Мотовилов Ю.Г. Оценки антропогенных загрязнений речных бассейнов тяжелыми металлами на основе модели ECOMAG // Сб. науч. тр. «Научное обеспечение реализации “Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.”». – 2015. – Т. 1. – С. 335–343.