

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В БАССЕЙНЕ РЕКИ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ (на примере реки Прони, Рязанская область)

Е.В.Веницианов*, А.Н.Варнаков**

*Институт водных проблем РАН, Москва,

**Комитет по охране окружающей среды, г. Рязань

Водоохрана средних рек является одной из приоритетных проблем водного хозяйства. Средние реки (по Вендрову, длиной 101-500 км) во многих случаях имеют более высокий уровень удельной антропогенной нагрузки, чем крупные реки, и относительно меньший потенциал самоочищения. Исторически средние реки являлись фактором, консолидирующим территориально-хозяйственный комплекс, и в настоящее время они продолжают функционировать, оказывая сильное воздействие на их экологическое состояние. Важность таких водных объектов для жизни большей части населения России продолжает оставаться значительной. Они являются источниками водных ресурсов для промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных объектов, имеют большой рекреационный потенциал, являются своеобразным «скелетом» гидрографической сети бассейнов больших рек.

Река Проня – типичный представитель категории средних рек России. Ее длина – 336 км, площадь водосбора 10200 км², 96% которой расположены в Рязанской области. Тем самым, именно здесь возникают проблемы, связанные с водоохраной в бассейне, и здесь же находится решение этих проблем.

Основные проблемы бассейна р. Прони являются типичными для регионов, расположенных на территории Волжского бассейна. Это стабилизация региональной экологической ситуации, повышение эффективности всего хозяйства бассейна, причем улучшение социально-экономического положения должно достигаться экологически приемлемым образом. Для решения этих проблем необходима научно обоснованная стратегия водоохраны, которая должна быть реализована с учетом как экономических, так и экологических факторов.

В статье изложены методические основы оценки и выбора наиболее эффективных по эколого-экономическим показателям программ снижения антропогенной нагрузки в бассейне реки (на примере бассейна р. Прони).

Решены следующие задачи:

1. На основе анализа физико-географических и эколого-экономических данных из литературных и фондовых материалов, а также экспедиционных исследований дана характеристика качества вод и уровня антропогенной нагрузки в бассейне Прони. Указаны приоритетные источники загрязнения (промышленность, жилищно-коммунальное хозяйство, неконтролируемый сток с хозяйственно освоенных территорий). С учетом кратности превышения ПДК загрязняющих веществ и частоты случаев превышения ПДК определены приоритетные компоненты по данным государственного мониторинга по составу природных вод (нефтепродукты, нитриты, БПК) и в таблице «Характеристика сбросов ЗВ на приоритетных предприятиях» приоритетные загрязняющие вещества по составу сточных вод (легкоокисляемые вещества по БПК_п, взвешенные вещества, азот аммонийный, нитриты, фосфаты, нефтепродукты и СПАВ).

Таблица 1.

Характеристика сбросов ЗВ на приоритетных предприятиях.

Загрязняющее вещество	Масса сброса, т/год	Приведенная масса, т/год	Необходимая масса удаления (очистки), т/год
БПК _п	96,05	96,05	75,01
Взвешенные в-ва	89,15	26, 74	13,78

Аммонийный азот	33,45	257,23	200,49
Нитриты	2,46	92,25	62,15
Фосфаты	14,67	220,05	194,65
Нефтепродукты	5,67	340,02	311,82
СПАВ	1,2	36,0	25,88
Сумма		1068.34	821.63

Приведенные массы рассчитываются по формуле:

$$M_{\text{привед.}} = M_{\text{физич.}} \times \text{ПДК}_{\text{БПК}} / \text{ПДК}_{\text{вещества}}$$

Отмечается повышенный фон марганца, железа и меди, что связано с характером питания рек. В настоящее время наибольший вклад в загрязнение водных объектов бассейна вносят точечные источники, однако потенциальную угрозу, по мере роста производства, составляют диффузные источники.

2. Собраны и систематизированы данные по основным источникам загрязнения: объему и составу сточных вод, применяемым технологиям очистки сточных вод, эффективности их работы. Полный кадастр основных источников антропогенной нагрузки на водные объекты бассейна включает:

- 50 промышленных предприятий,
- 4 предприятия энергетики,
- 23 предприятия коммунально-бытового хозяйства,
- 154 сельскохозяйственных предприятия,
- 7 предприятий транспорта и связи,
- 7 строительных предприятий.

В таблице «Характеристика сбросов ЗВ на приоритетных предприятиях» представлены данные расчетов необходимых уровней очистки сточных вод для достижения установленных нормативов. Приоритетными веществами названы те, для которых общая масса сбросов ЗВ составляет до 95% суммарных сбросов.

3. На основе собранной информации произведено водохозяйственное районирование бассейна, что показано на рисунке 1. В основе районирования лежит наличие системы наблюдений за качеством вод в бассейне в соотношении «входной створ» – «выходной створ», а также наличие приоритетных источников загрязнения (не менее одного). Всего

выделено 7 водохозяйственных участков. Выделено 15 приоритетных источников загрязнения (табл. 2), сточные воды которых подлежат дополнительной очистке.

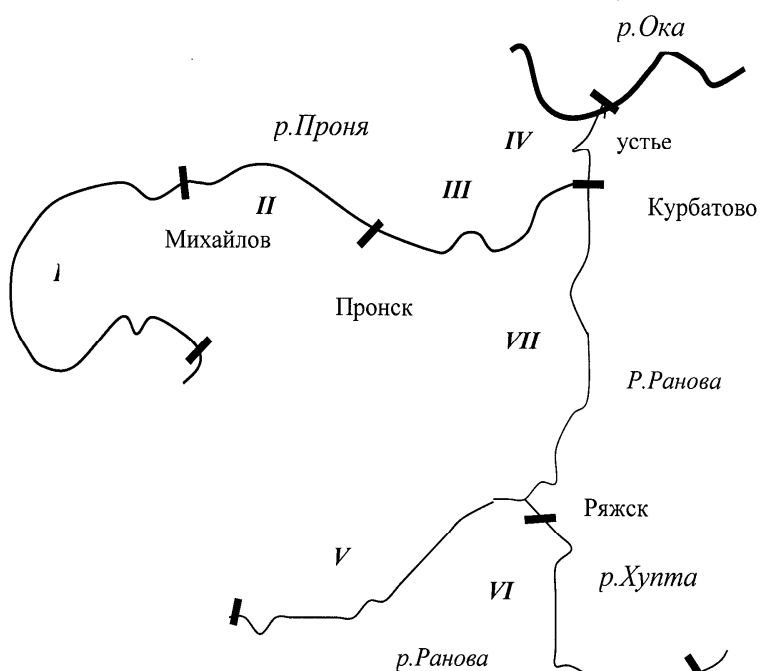


Рис.1 Водохозяйственные участки р.Прони и ее притоков (римские цифры – номера водохозяйственных участков)

Таблица 2.

Перечень 15 приоритетных предприятий бассейна р.Прони

№	Субъект хозяйствования, тип собственности	Отраслевая характеристика	Объем СВ, подлежащих дополнительной очистке, тыс. м3/год
1	«Скопинский автоагрегатный завод», ОАО	Приборостроение	550,0
2	«Скопинский завод электронасосов», ОАО	Приборостроение	22,5
3	«Скопинский стекольный завод», ОАО	Стекольная и фарфорофаянсовая промышленность	180,0
4	«Михайловский КСМ», АОТ	Промышленность по добыче и обработке облицовочных материалов	107,0
5	«Кортекс», ЗАО	Текстильная промышленность	2531,0
6	«Рязский мясокомбинат», ОАО	Мясная и молочная промышленность	858,0
7	ГП завод «Эластик»	Другие производства	660,5
8	Рязанская ГРЭС, ОАО	РАО ЕЭС	6081,11
9.	ЖКХ п. Центральный, Милославский район	ЖКХ	82,0
10.	п. Октябрьский, Михайловский район, МУП ЖКХ.	ЖКХ	411,0
11	МП ЖКХ г. Михайлов	ЖКХ	131,1
12	Пронское РМУП ЖКХ г. Пронск	ЖКХ	271,0
13	Скопинское МУП ЖКХ г. Скопин	ЖКХ	2085,0
14	АОЗТ «Погореловское»,	Животноводство	40,0

	Пронский район		
15	Ж/д узел г.Ряжск, Ряз. дистанции	МПС РФ	304,9
Итого:			14 315,0

4. Выбор системы водоохраных мероприятий с учетом эколого-экономических требований.

Математически постановка задачи оптимизации при выборе водоохраных мероприятий достаточно проста (Пряжинская с соавт, 2002): требуется выбрать такой комплекс мероприятий, при котором сумма приведенных затрат при строительстве или реконструкции водоохранного сооружения или проведенного мероприятия, равная сумме приведенных эксплуатационных и капитальных затрат, стремится к минимуму. Однако конкретные алгоритмы или конкретные результаты оптимизации системы водоохраных мероприятий до сих пор не известны. Возможны 2 варианта постановки.

Постановка 1. Рассматривается водохозяйственный участок, на котором расположено N предприятий ($i = 1...N$). Сбрасывается в водный объект M загрязняющих веществ ($j = 1...M$) массой q_{ij} .

Очистка единицы массы j -го вещества на i -том предприятии стоит (по сумме приведенных затрат) α_{ij} . Поэтому очищается часть β_{ij} ($\beta_{ij} < 1$) массы сброса, то стоимость очистки сброса на i -том предприятии будет равна:

$$S_i = \sum \alpha_{ij} q_{ij} \beta_{ij} \quad (\text{сумма по } j = 1...M).$$

При этом будет удалено из сточных вод по всему водохозяйственному участку следующие массы каждого ЗВ:

$$Q_j = \sum q_{ij} \beta_{ij} \quad (\text{сумма по } j = 1...M).$$

где $i = 1...N$. Задача оптимизации заключается в следующем: задаются уровни снижения загрязнения по группам веществ Q_j . Необходимо установить минимальные затраты на очистку по предприятиям данного участка, т.е. достичь минимума суммы затрат

$$S = \sum S_i \rightarrow \min \quad (\text{сумма по } i = 1...N).$$

Постановка 2. Другая постановка задачи оптимизации – поиск максимума массы удаленных ЗВ при наличии выделенных средств на водоохрану: задается фиксированная величина затрат S . Необходимо найти максимум Q массы задержанных ЗВ:

$$Q = \sum Q_j \rightarrow \max \quad (\text{сумма по } j = 1...M).$$

где Q_j – удерживаемая масса j -го загрязняющего вещества. Необходимо уточнить величину Q , поскольку критерий должен быть един, а рассматривается несколько (M) ЗВ с разными ПДК_{вр}. Возможны два варианта постановки:

2.1. Вводится понятие приведенных масс, например, путем нормировки по ПДК:

$$Q = \sum \text{ПДК}_1 / \text{ПДК}_j Q_j, \quad (j = 1...M)$$

где ПДК_1 – норматив выбранного в качестве базисного вещества (например, БПК, как и принято в нашем случае),

ПДК_j – норматив j -го вещества.

2.2. Определяются порядок приоритетности веществ, например, медь, фосфор, нитраты, нитриты.

Сначала происходит снижение (до нормативного уровня) массы Q_{Cu} , затем Q_P , затем Q_{NO_3} и т.д. до исчерпания заданной суммы затрат S . Оптимизационная задача заключается в распределении квот между предприятиями для исчерпания необходимых масс Q_j .

Далее рассмотрим методы решения этих сформулированных оптимизационных задач.

Задача 1. Минимизация затрат при заданном уровне снижения нагрузки.

Каждое нормируемое загрязняющее вещество (ЗВ) рассматривается независимо. Рассмотрим некоторое ЗВ с индексом j . Для доведения до нормативов необходимо

снизить сброс на данном водохозяйственном участке на величину q^j , причем необходимая масса очистки на каждом предприятии q_{ij} , так что $q^j = \sum q_{ij}$

Предприятия ($i = 1 \dots N$) ранжируются по возрастанию удельной стоимости очистки единицы массы данного ЗВ (табл. 3): $\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_N$. Удельная стоимость очистки α вычисляется как приведенные затраты, отнесенные к единице массы очищаемого ЗВ, которые определяются по формуле:

$$\alpha = (K + \mathcal{E})/M,$$

где K – капитальные затраты, отнесенные к одному году (срок действия капитальных затрат определяется либо на основе нормативов амортизации капитального оборудования, либо как расчетный срок действия оборудования), $\mathcal{E}$ – эксплуатационные затраты на год, M – масса очищенного ЗВ в год. Эксплуатационные затраты определяются по формуле:

$$\mathcal{E} = P + A + X$$

где P – затраты на рабочую силу, A – амортизационные затраты, X – затраты на расходные материалы, транспорт и пр.

В табл. 3 приведены необходимые данные для реализации алгоритма оптимизации

Таблица 3

Характеристики сброса и очистки рассматриваемого j -го ЗВ

№ предприятия	1	2	...	N
Удельная стоимость очистки ЗВ	α_{1j}	α_{2j}	...	α_{Nj}
Масса сброса ЗВ	Q_{1j}	Q_{2j}	...	Q_{Nj}
Суммарная масса очистки	q_{1j}	$q_{1j} + q_{2j}$	...	
Суммарная стоимость очистки	$\alpha_{1j}q_{1j}$	$\alpha_{1j}q_{1j} + \alpha_{2j}q_{2j}$	...	$\alpha_{1j}q_{1j} + \alpha_{2j}q_{2j} + \dots + \alpha_{Nj}q_{Nj}$

Задача 2.1. Максимизация удаляемой массы ЗВ при заданном уровне затрат на водоохрану (метод приведенных масс).

Вводится приведенная удельная стоимость очистки сточных вод от каждого ЗВ γ_{ij} (i -тое предприятие, j -тое ЗВ), который рассчитывается на основе следующей формулы:

$$\gamma_{ij} = \alpha_{ij}/(\text{ПДК}_i/\text{ПДК}_j)$$

и производится ранжирование компонентов матрицы $\parallel \gamma_{ij} \parallel$ по порядку убывания этих коэффициентов. Величины приведенных удельных стоимостей очистки γ располагаются в порядке их возрастания:

$$\gamma^{(1)} \leq \gamma^{(2)} \leq \gamma^{(3)} \leq \dots$$

Производится поэтапный расчет по порядку возрастания величин $\gamma^{(i)}$.

1. Оценивается стоимость очистки массы сброса $q^{(1)}$ на том предприятии и того ЗВ, индекс которых соответствует $\gamma^{(1)}$. Эта стоимость равна:

$$S^{(1)} = q^{(1)} \gamma^{(1)}$$

Осуществляется проверка:

$$S^{(1)} \leq S,$$

не превышает ли стоимость очистки выделенную сумму S на всю программу.

Если это условие выполнено, переходят ко второму этапу расчета.

2. Выбирается следующий по порядку показатель $\gamma^{(2)}$ и соответствующая ему масса сброса $q^{(2)}$. Стоимость очистки равна:

$$S^{(2)} = q^{(2)} \gamma^{(2)}$$

Выполняется аналогичная проверка:

$$S^{(1)} + S^{(2)} \leq S.$$

Далее алгоритм повторяется путем поэтапного перехода к последующим членам ряда $\gamma^{(i)}$ до полного исчерпания выделенной суммы S .

Задача 2.2. Максимизация удаляемой физической массы ЗВ при заданном уровне затрат на водоохрану при заданном порядке приоритетности веществ.

Устанавливается порядок приоритетности веществ, например, токсичные металлы (медь), биогенные вещества (фосфор, нитраты, нитриты).

Оптимизационная задача заключается в распределении квот между предприятиями для исчерпания необходимых для достижение нормативов масс очистки Q_j , при выполнении условия, что суммарные затраты не превышают заданный лимит S .

Сначала происходит снижение (до нормативного уровня) массы Q_{Cu} , затем Q_P , затем Q_{NO_3} и т.д. до исчерпания заданной суммы затрат S .

Оптимизация производится только «внутри» массы данного вещества и последовательность действий такова:

1. Определяется последовательность сбросов по первому ЗВ. Предприятия ранжируются по удельной стоимости очистки:

$$\alpha_{11} \leq \alpha_{12} \leq \dots \leq \alpha_{1N}$$

Рассчитываются стоимости очистки по первому веществу для ранжированных предприятий (см. табл. 4):

Таблица 4

Данные для расчета оптимального режима очистки

№ предприятия	1	2	...	N
Удельная стоимость очистки первого ЗВ	α_{11}	α_{12}	...	α_{1N}
Масса сброса ЗВ	q_{11}	q_{12}	...	q_{1N}
Суммарная стоимость очистки	$\alpha_{11} q_{11}$	$\alpha_{11} q_{11} + \alpha_{12} q_{12}$	...	$\alpha_{11} q_{11} + \alpha_{12} q_{12} + \dots + \alpha_{1N} q_{1N}$

Производится проверка выполнения условия неперевышения суммарной стоимости очистки на каждом этапе расчета выделенной суммы S на все мероприятия, а именно:

если $\alpha_{11} q_{11} \leq S$, то переходят к следующему этапу и производят проверку условия:

$$\alpha_{11} q_{11} + \alpha_{12} q_{12} \leq S.$$

Если произошло исчерпывание необходимой массы очистки до превышения суммы S , то переходят ко второму ЗВ по порядку приоритетности, и процедура повторяется.

Алгоритмы представленных здесь задач оптимизации реализованы в виде программ для ПК и представлены в приложениях к диссертации.

Исходные данные для оптимизации водоохранных мероприятий в бассейне Прони

Выбор приемлемого варианта оптимизации принадлежит ЛПР – «лицу, принимающему решению». Рассмотрены оба варианта оптимизации. Анализ и обоснование принимаемых решений в качестве иллюстрации выполнены для I водохозяйственного участка.

I водохозяйственный участок.

I вариант оптимизации (минимизация затрат при определенном уровне очистки сточных вод по группе приоритетных загрязняющих веществ).

Приоритетными веществами, подлежащими очистке на этом участке, являются: БПК_п, взвешенные вещества (ВВ), аммонийный азот (NH₄), фосфаты (P_{мин}) и нитриты (NO₂).

Производится выбор технологий очистки.

Перечень предприятий на I водохозяйственном участке:

1. пос. Октябрьский, Михайловский район, МУМП ЖКХ, 222 км от устья Прони.
Очистные сооружения: биологическая очистка.

2. АООТ «Михайловский КСМ», 213 км от устья. Очистные сооружения: биологическая очистка, доочистка на биофильтрах.

3. ММПЖКХ г. Михайлова, 205 км от устья. Очистные сооружения: биологическая очистка; сооружения не работают.

Для экономических расчетов необходимы данные по приведенным удельным затратам для тех или иных технологических схем очистки. Однако предприятия данные о стоимости очистки, как правило, включают в общий перечень затрат и не ведут расчетов удельной стоимости, капитальных и эксплуатационных затрат. Поэтому при расчетах использовались данные о средней удельной стоимости различных технологий очистки сточных вод в странах ЕС (табл. 5).

Таблица 5

Обобщенные показатели стоимости технологий очистки сточных вод (Пряжинская, 1996)

Технология очистки	Эффективность очистки, %				Приведенные кап. затраты	Эксплуатац. затраты
	БПК _п	ВВ	Р _{общ}	N _{общ}	долл/(м ³ год)	
МО	30	60	15	15	0.90	0.064
ХМО	55	80	75	25	0.98	0.103
КОВ	70	90	90	30	1.20	0.122
ПБО	90	90	30	30	1.65	0.316
ХМО+ПБО	90	90	90	35	1.54	0.143
КОВ+ПБО	95	95	95	35	1.73	0.165
ХМО+ПБО+ЧД	95	90	90	60	1.92	0.168
КОВ+ПБО+ЧД	95	95	95	60	2.11	0.200
КОВ+ПБО+Д	97	95	95	85	2.37	0.210

Примечание. МО – механическая очистка; ХМО – МО с низкой дозировкой коагулянтов; КОВ – коагулирование и осаждение; ПБО – биологическая обработка в аэротенках; Д – денитрификация; ЧД – частичная денитрификация.

В табл. 6 приведены массы сброса приоритетных ЗВ и уровни превышения ПДК по этим веществам в контрольном створе.

Таблица 6

Данные о сбросах приоритетных ЗВ в воды р. Прони и уровни превышения ПДК_{вр} в контрольном створе

Приоритетные ЗВ	Масса сброса на I участке, т/год	Доля ПДК _{вр} в контрольном створе
БПК _п	33,536	1,8
Взвешенные вещества	15,844	1,9
Азот аммонийный	1,671	0,33
Нитриты	0,082	1,5
Фосфаты	1,251	0,2

Минимальная масса очистки рассчитывалась, исходя из требования, которое является определяющим в соответствии с нормативными документами: в контрольном створе концентрация ЗВ не должна превышать ПДК_{вр}. Поскольку контрольные створы на водохозяйственных участках располагаются сравнительно недалеко от створов сброса (2-4 км), то это допущение является приемлемым.

При выборе технологий очистки следует ориентироваться на уже имеющееся на предприятиях оборудование. Из приведенных в табл. 5 технологий следует выбирать наиболее дешевые и в то же время обеспечивающие очистку по приоритетным веществам. Этим требованиям удовлетворяют следующие дополнительные технологии:

Предприятие 1. ХМО (Механическая очистка с низкой дозировкой коагулянтов). Эта технология имеет самый низкий уровень суммарных (капитальных и эксплуатационных) затрат и очистку именно приоритетных ЗВ.

Предприятие 2. КОВ (коагулирование и осаждение) Поскольку биологическая очистка и доочистка на биофильтрах не обеспечивает достаточный уровень очистки, следует дополнить очистку стадией коагулирования и осаждения, поскольку при этом можно обойтись без капитальных затрат.

Предприятие 3. ПБО – биологическая обработка в аэротенках. Поскольку сооружения биологической очистки имеются, необходимы только эксплуатационные затраты.

В последующих расчетах используем расчетные единицы (р.е.), которые численно совпадают с данными, приведенными в табл. 5 (доллары США). Коэффициент пересчета должен учитывать соотношение затрат в рублях к затратам, перечисленным в табл. 5, выраженным в долларах. Использование расчетных единиц позволяет оценить соотношение затрат и выбор оптимальных нагрузок на очистные сооружения, независимо от реального соотношения р.е. к доллару.

В табл. 7 приведены уровни очистки каждой из выбранных дополнительных технологий по приоритетным ЗВ, от которых следует очищать сточные воды..

Таблица 7

Уровни очистки каждой из выбранных дополнительных технологий по приоритетным ЗВ

Загрязняющие вещества, подлежащие удалению	Необходимый % очистки	ХМО (Предприятие 1)	КОВ (Предприятие 2)	ПБО (Предприятие 3)
БПК _п	44,5	55	70	90
Взвешенные вещества	47,4	80	90	90
Нитриты	33,3	25	30	30
Стоимость очистки, р.е./м ³ год)		0,98/0,103* Σ = 1,083	0,122 Σ = 0,122	0,316 Σ = 0,316

Примечания: * – числитель – капитальные затраты, знаменатель – эксплуатационные затраты, р.е. – расчетная единица.

Каждая из дополнительных технологий обеспечивает необходимый уровень очистки по БПК_п и взвешенным веществам и не обеспечивает по нитритам.

По стоимости очистки единицы массы ЗВ предприятия располагаются в последовательности: 2, 3, 1. Поэтому целесообразно провести полную очистку стоков на предприятиях 2, 3 и затем провести очистку части стока на предприятии 1, чтобы достичь необходимого уровня очистки по всему I участку.

В табл. 8 приведены результаты расчета оптимальных уровней очистки по всем предприятиям по БПК_п на I водохозяйственном участке.

Таблица 8

Характеристики сброса и очистки БПК на I участке

№ предприятия	1	2	3	Сумма по участку
Объем сточных вод	411	107	131,1	
Удельная стоимость очистки БПК _п , р.е./м ³	1,083	0,122	0,316	
Метод очистки БПК _п	ХМО	КОВ	ПБО	
Эффективность очистки от БПК _п , %	55	70	90	

Масса сброса БПК _п , т/год	32,194	0,556	0,786	33,536
Масса удаления БПК _п , т/год	13,8	0,39	0,71	14,9
Объем очищенных СВ, тыс. м ³ /год	320,3	107	131,1	
Стоимость очистки, тыс. р.е.	346,9	13,05	41,43	401,38

В оптимальном режиме (по стоимости) полностью очищаются СВ на предприятиях 2 и 3 и частично (77,9%) – на предприятии 1.

При данном объеме СВ взвешенные вещества очищаются в большем количестве, чем это требуется по качеству воды в контрольном створе: реально очищается 67,6% ВВ, что выше требуемого уровня очистки (47,4%). Однако здесь дополнительные затраты отсутствуют.

Кроме БПК и ВВ дополнительные технологии обеспечивают также очистку от соединений фосфора и азота. Обеспечивается дополнительная очистка 21,3% аммонийного азота, 56,5% фосфатов и 19,5% нитритов.

Однако выбранные технологии не обеспечивают необходимого уровня снижения нагрузки по нитритам (33,3%), см. табл.7. Дополнительную доочистку от нитритов (0,011 т/год) дешевле всего осуществить с помощью сорбционной очистки на активированных углях. При этом может быть обеспечен 100%-ный уровень доочистки. Достаточно дополнительно пропускать через сорбционный фильтр 55,134 тыс. м³/год сточных вод. Чтобы упростить технологию, можно использовать угольный фильтр без регенерации. Используются гранулированные фильтры с толщиной фильтрующего слоя 1,5-2,0 м, крупностью зерен 1-2 мм и скоростью фильтрования 7-10 м/час. Чтобы обеспечить очистку 55, 134 тыс. м³/год площадь сечения фильтра должна составить 0,63 м² при объеме фильтрующей загрузки – 1, 26 м³. Стоимость загрузки составит сумму порядка 53 тыс. р.е. Емкости фильтра (порядка 0,2-0,8 г/г) достаточно для работы в течение нескольких лет. Необходимо периодически осуществлять промывку фильтров водопроводной водой для смыва взвесей.

Таким образом, чтобы обеспечить необходимый уровень очистки по приоритетным ЗВ на I водохозяйственном участке, необходимо оснастить предприятия дополнительными технологиями при суммарных затратах – 454,38 тыс. р.е.

II вариант оптимизации (при определенном уровне затрат на водоохранные мероприятия оптимизация очистки сточных вод по группе приоритетных загрязняющих веществ по критерию максимум приведенных масс).

При выборе дополнительных технологий очистки можно использовать данные табл. 7, за исключением второго столбца (% очистки). В табл. 9-10 приведены данные по приведенной массе (приведенная масса сброса равна произведению физической массы сброса на коэффициент пересчета), причем за базовый компонент принято содержание органики по БПК_п, и по приведенным удельным стоимостям очистки γ_{ij} приоритетных ЗВ по предприятиям.

Таблица 9

Приведенные массы сброса приоритетных ЗВ по предприятиям

Загрязняющие вещества, подлежащие удалению из СВ	Коэффициент пересчета (ПДК _i /ПДК _{БПК})	ХМО (Предприятие 1)	КОВ (Предприятие 2)	ПБО (Предприятие 3)
БПК _п	1,0	32,194	0,556	0,786

Взвешенные вещества	0,30	3,850	0,353	0,551
Аммонийный азот	7,69	10,658	1,481	0,707
Фосфаты	15	15,09	1,124	2,556
Нитриты	37,5	3,075	–	–
Сумма приведенных масс сбросов по предприятиям, т		64,867	3,514	4,600

Таблица 10

Значения приведенной удельной стоимости очистки γ_{ij} приоритетных ЗВ по предприятиям

Загрязняющие вещества, подлежащие очистке	Коэффициент пересчета (ПДК _j /ПДК _{БПК})	ХМО (Предприятие 1)	КОВ (Предприятие 2)	ПБО (Предприятие 3)
Объем СВ, тыс. м ³ /год		411	107	131,1
БПК _п	1,0	1,083	0,122	0,316
Взвешенные вещества	0,30	3,61	0,407	1,053
Аммонийный азот	7,69	0,141	0,0159	0,0411
Фосфаты	37,5	0,0289	0,00325	0,00843
Нитриты	15	0,0722	–	–
Стоимость очистки, р.е./м ³ год		0,98/0,103* $\Sigma = 1,083$	0,122 $\Sigma = 0,122$	0,316 $\Sigma = 0,316$

Примечание: приведенная удельная стоимость очистки равна отношению удельной стоимости очистки к коэффициенту пересчета.

Производится ранжирование значений приведенной удельной стоимости очистки. Отметим, что каждая дополнительная технология позволяет удалять комплекс ЗВ. поэтому ранжирование по стоимости можно провести по предприятиям:

Предприятие 2 < Предприятие 3 < Предприятие 1.

Следовательно, реализация алгоритма будет проводиться с расчетом на один компонент, но при учете приведенных масс всех очищаемых компонентов. В табл. 11 приведены рассчитанные характеристики оптимальных вариантов очистки СВ.

Таблица 11

Характеристики оптимальных вариантов очистки СВ по предприятиям при различных суммарных затратах на I водохозяйственном участке

Характеристики вариантов	Предприятие 1	Предприятие 2	Предприятие 3	Сумма по всем предприятиям
Стоимость водоохран-ных мероприятий	100 000 р.е.			
Объем очищаемых СВ, тыс. м ³ /год	40,2	107	131,1	

Стоимость очистки, тыс. р.е.	46,52	13,05	41,43	100
Приведенные удельные затраты, тыс.р.е./кг	5,953	6,070	2,044	14,067
Стоимость водоохран-ных мероприятий	200 000 р.е.			
Объем очищаемых СВ, тыс. м ³ /год	132,5	107	131,1	
Стоимость очистки, тыс. р.е.	146,52	13,05	41,43	200
Приведенные удельные затраты, тыс.р.е./кг	19,623	6,070	2,044	27,747
Стоимость водоохран-ных мероприятий	300 000 р.е.			
Объем очищаемых СВ, тыс. м ³ /год	224,9	107	131,1	
Стоимость очистки, тыс. р.е.	246,52	13,05	41,43	300
Приведенные удельные затраты, тыс.р.е./кг	33,307	6,070	2,044	41,421
Стоимость водоохран-ных мероприятий	400 000 р.е.			
Объем очищаемых СВ, тыс. м ³ /год	317,2	107	131,1	
Стоимость очистки, тыс. р.е.	346,52	13,05	41,43	400
Приведенные удельные затраты, тыс.р.е./кг	46,976	6,070	2,044	55,090
Стоимость водоохран-ных мероприятий	500 000 р.е.			
Объем очищаемых СВ, тыс. м ³ /год	409,5	107	131,1	
Стоимость очистки, тыс. р.е.	446,52	13,05	41,43	500
Приведенные удельные затраты, тыс.р.е./кг	60,645	6,070	2,044	68,759

Анализируя данные табл. 11, можно отметить, что происходит рост приведенных удельных затрат (в тыс.р.е./кг) по мере роста общих выделенных затрат на мероприятия. Следовательно, даже при небольших затратах на водоохрану на I участке в оптимальном варианте необходимо провести полную очистку стока на предприятиях с минимальной удельной стоимостью очистки, а затем в зависимости от выделенных средств вести очистку на предприятии 1.

Отметим, что принцип объединения затрат предприятий, расположенных на одном водохозяйственном участке, является распространенным в развитых странах (так называемый принцип «bubble», или пузыря), когда происходит объединение средств

нескольких субъектов хозяйствования в общую систему снижения нагрузки и финансирования водоохранных мероприятий. При этом происходит внутренний перерасчет затрат между предприятиями при условии, что квоты на снижение нагрузки выделены суммарно для всех субъектов, расположенных на водохозяйственном участке.

Предложенный метод оптимизации позволяет найти оптимальный вариант распределения квоты для всех участников, что в конечном счете позволяет экономить ресурсы и добиваться оптимального общего снижения нагрузки на участке (рис.2).

Вместе с тем показан эффект «снижающейся эффективности» при увеличении выделенных сумм на водоохрану и эффективность объединения предприятий в группу, ведущую совместную очистку СВ.

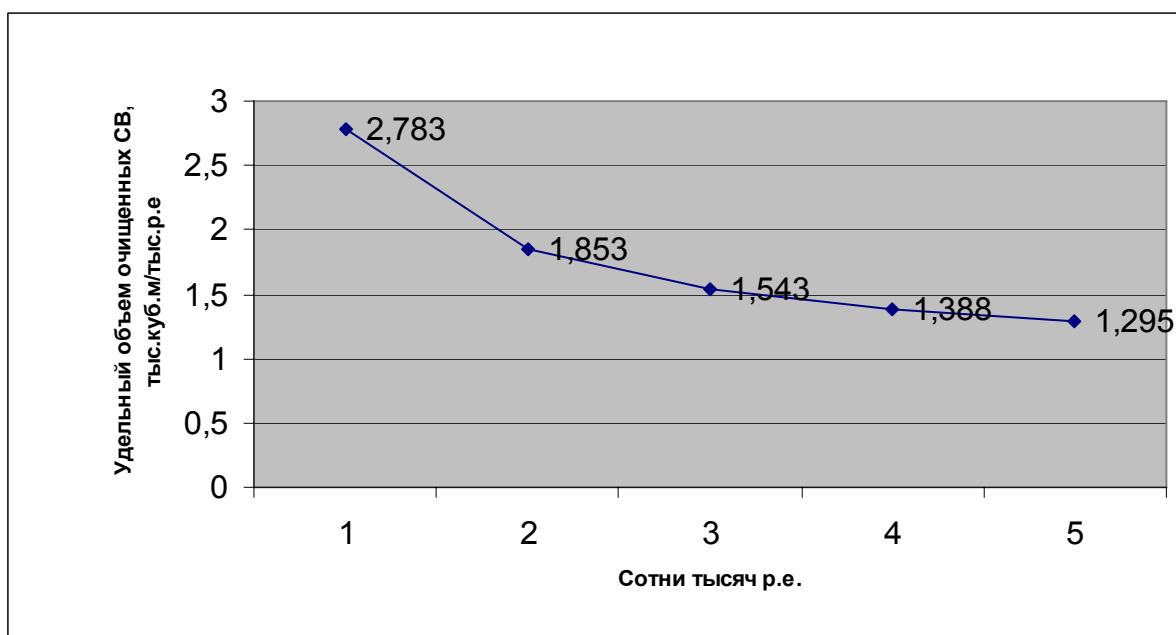


Рис.2. Эффект снижения эффективности очистки

При реализации первого алгоритма оптимизации приведем итоги выполненных расчетов. Перечень дополнительных технологий для остальных предприятий.

Предприятие 4. ПБО в виде капитальных и эксплуатационных затрат.

Предприятие 5. ПБО в виде эксплуатационных затрат.

Предприятие 8. КОВ+ПБО в виде капитальных и эксплуатационных затрат.

Предприятие 9. КОВ в виде эксплуатационных затрат + угольный фильтр.

Предприятие 10. ХМО в виде эксплуатационных затрат.

Предприятие 11. ХМО в виде капитальных и эксплуатационных затрат + уг. фильтр.

Предприятие 12. КОВ в виде эксплуатационных затрат + уг. фильтр.

Предприятие 13. КОВ в виде эксплуатационных затрат.

Предприятие 14. КОВ в виде эксплуатационных затрат + уг. фильтр.

Предприятие 15 КОВ в виде эксплуатационных затрат + уг. фильтр.

Результаты расчета по I варианту оптимизации для всех участков представлены в табл. 12.

Таблица 12

Характеристики сброса и очистки СВ по I варианту оптимизации для предприятий

№ предприятия	4	5	8	9	10	11	12	13	14	15

Объем сточных вод, тыс. м ³ /год	271	40	82	22,5	180	550	2085	858	304,9	2531
Стоимость очистки, тыс. р.е.	476,1	11,69	275,4	72,745	18,54	1205,5	284,4	104,7	38,2	1008,8

В табл. 13 приведены итоговые значения затрат (по I варианту оптимизации) по водохозяйственным участкам.

Таблица 13

Итоговые значения затрат по I варианту оптимизации по водохозяйственным участкам

№ участка	1	2	5	6	7
Объем сточных вод, тыс. м ³ /год	649	311	3019	1163	2531
Объем очищенных СВ, тыс. м ³ /год	558	292	2956	1151	2531
Стоимость очистки, тыс. р.е.	374,5	487,8	1856,5	142,9	1008,8

В табл. 14 приведены итоговые значения затрат (по II варианту оптимизации) по водохозяйственным участкам. Были взяты затраты, близкие к затратам в табл.13.

Таблица 14

Итоговые значения затрат по II варианту оптимизации по водохозяйственным участкам

№ участка	1	2	5	6	7
Объем сточных вод, тыс. м ³ /год	649	311	3019	1163	2531
Объем очищенных СВ, тыс. м ³ /год	555	258	2767	980	2511
Стоимость очистки, тыс. р.е.	400	400	1500	120	1000

Данные табл. 13 и 14 позволяют оценить относительную эффективность обоих вариантов (табл. 15, рис. 2).

Таблица 15.

Сравнительная эффективность двух вариантов оптимизации по участкам

№ участка	1	2	5	6	7
Объем сточных вод, тыс. м ³ /год	649	311	3019	1163	2531
Удельная стоимость очистки по I варианту оптимизации (тыс.р.е/тыс. м ³ очищаемых СВ /год.)	0,67	1,67	0,63	0,124	0,396
Удельная стоимость очистки по II варианту оптимизации (тыс.р.е/тыс. м ³ очищаемых СВ /год.)	0,72	1,55	0,54	0,122	0,395

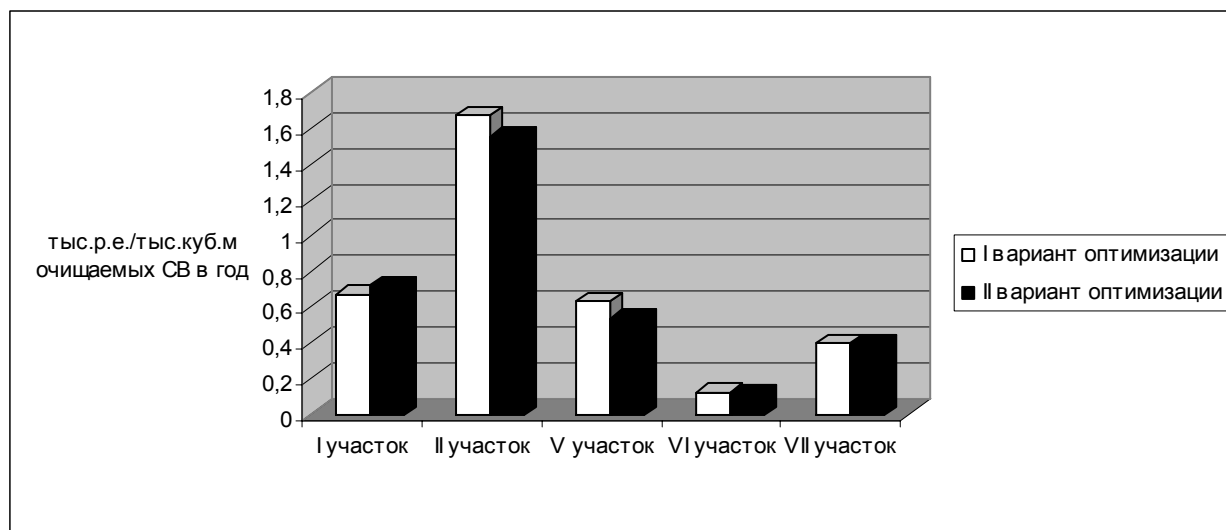


Рис. 2. Удельная стоимость очистки по I и II варианту оптимизации

Таким образом, значения удельной эффективности в обоих вариантах оптимизации сравнительно близки, что позволяет использовать любой из вариантов в зависимости от тех финансовых условий, которыми располагает управляющий орган.

Эти результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Необходимо выделить приоритетные источники загрязнения (промышленность, жилищно-коммунальное хозяйство, неконтролируемый сток с хозяйственно освоенных территорий). Для р. Прони определены приоритетные компоненты по данным мониторинга (нефтепродукты, нитриты, БПК) и приоритетные загрязняющие вещества по составу сточных вод (БПК, взвешенные вещества, азот аммонийный, нитриты, фосфаты, нефтепродукты и СПАВ).
2. Далее рассчитываются необходимые уровни очистки сточных вод для достижения установленных нормативов.
3. Производится ранжирование наиболее значимых источников загрязнения, выделено 15 объектов, объединенных в 7 водохозяйственных участков.
4. Разработаны методики оптимизации водоохранных программ в бассейне.
5. Сформулированы 2 основные задачи эколого-экономической оптимизации программ водоохраны в бассейне.
6. На основе этих постановок разработаны алгоритмы оптимизации на основе линейного программирования и составлены соответствующие программы для ПК.
7. Для 7 водохозяйственных участков и 15 приоритетных источников определены оптимальные программы водоохраны.
8. Указано на эффективность применения принципа «bubble», т.е. объединения предприятий в группы, ведущие совместную очистку сточных вод на общих очистных сооружениях.