

Ю.С. ТУЧКОВЕНКО, В.А. ИВАНОВ, О.Ю. САПКО



**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БЕРЕГОВЫХ
АНТРОПОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ
НА КАЧЕСТВО ВОД ОДЕССКОГО РАЙОНА
СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ**

СОДЕРЖАНИЕ

**МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ
ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Ю.С. Тучковенко, В.А. Иванов, О.Ю. Сапко

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БЕРЕГОВЫХ АНТРОПОГЕННЫХ
ИСТОЧНИКОВ НА КАЧЕСТВО ВОД ОДЕССКОГО РАЙОНА
СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ**

| | |
|---|----|
| Глава 3 Гидрохимический режим и качество вод Одесского района северо-западной части Черного моря по данным мониторинга и инфракрасной конструкции гидрохимического режима | 17 |
| 3.2 Интегральная оценка качества морских вод | 17 |
| 3.2.1 Оценка качества морской среды по комплексному показателю экологического состояния | 17 |
| 3.2.2 Оценка уровня эвтрофикации морской среды с помощью индекса биомассы фитопланктона | 17 |
| Глава 4 Оценка роли береговых антропогенных источников в формировании качества вод шельфовых морских акваторий | 73 |
| 4.1 Описание численной математической модели формирования качества вод шельфовых морских акваторий | 73 |

УДК 504.42

Оценка влияния береговых антропогенных источников на качество вод Одесского района северо-западной части Черного моря / Тучковенко Ю.С., Иванов В.А., Сапко О.Ю.; НАН Украины, Морской гидрофизический институт, Одесский государственный экологический университет. – Севастополь, 2011. – с.169, ил. 61, табл. 43, библ. 74.

ISBN 978-966-02-6145-7

Обобщена и систематизирована информация о береговых антропогенных источниках загрязнения морской среды Одесского района северо-западной части Черного моря, а также определена их роль в формировании качества вод исследуемой акватории. Работа выполнена на основе анализа данных многолетнего экологического мониторинга и результатов численного математического моделирования.

Для специалистов в области экологии и охраны морской среды, океанологов, гидроэкологов, студентов гидрометеорологических и экологических специальностей.

Оцінка впливу берегових антропогенних джерел на якість вод Одеського району північно-західної частини Чорного моря / Тучковенко Ю.С., Иванов В.О., Сапко О.Ю.; НАН України, Морський гідрофізичний інститут, Одеський державний екологічний університет. – Севастополь, 2011. – с. 169, іл. 61, табл. 43, бібл. 74.

Узагальнена і систематизована інформація про берегові антропогенні джерела забруднення морського середовища Одеського району північно-західної частини Чорного моря, а також визначена їх роль у формуванні якості вод досліджуваної акваторії. Робота виконана на основі аналізу даних багаторічного екологічного моніторингу і результатів чисельного математичного моделювання.

Для фахівців в області екології і охорони морського середовища, океанологів, гідроекологів, студентів гідрометеорологічних і екологічних спеціальностей.

Рецензенты:

В.Н. Петлин, заведующий кафедрой конструктивной географии и картографии Львовского национального университета им. Ивана Франка, доктор геогр. наук, профессор

И.Д. Лоева, директор УкрНЦЭМ, профессор

ISBN 978-966-02-6145-7

© Ю.С. Тучковенко, В.А. Иванов, О.Ю. Сапко, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 5 |
| Глава 1 Физико-географическая и экологическая характеристика акватории Одесского района северо-западной части Черного моря.... | 8 |
| 1.1 Гидрометеорологический и гидрологический режимы..... | 8 |
| 1.2 Характеристика современного экологического состояния вод исследуемого района..... | 13 |
| Глава 2 Характеристика антропогенных источников загрязнения акватории Одесского района северо-западной части Черного моря .. | 18 |
| 2.1 Станции биологической очистки сточных вод г. Одессы..... | 18 |
| 2.2 Очистные сооружения Ильичевского морского торгового порта..... | 28 |
| 2.3 Очистные сооружения Одесского припортового завода..... | 31 |
| 2.4 Ливневая канализация..... | 35 |
| 2.5 Дренажный сток..... | 39 |
| 2.7 Относительный вклад береговых антропогенных источников в загрязнение морской среды Одесского района..... | 43 |
| 2.8 Трансформированный речной сток как источник антропогенного загрязнения исследуемой акватории..... | 50 |
| 2.8.1 Днепровско-Бугский лиман..... | 50 |
| 2.8.2 Днестр и Днестровский лиман..... | 52 |
| 2.9 Оценка относительного вклада совокупности береговых антропогенных источников и речного стока в загрязнение исследуемой акватории..... | 54 |
| Глава 3 Гидрохимический режим и качество вод Одесского района северо - западной части Черного моря по данным экологического мониторинга..... | 56 |
| 3.1 Гидрохимический режим | 56 |
| 3.2 Интегральная оценка качества морских вод..... | 65 |
| 3.2.1 Оценка качества морской среды с использованием комплексного показателя ее экологического состояния..... | 66 |
| 3.2.2 Оценка уровня эвтрофикации морской среды с использованием индекса E-TRIX | 71 |
| Глава 4 Оценка роли береговых антропогенных источников в формировании качества вод по результатам математического моделирования..... | 75 |
| 4.1 Описание численной математической модели формирования качества вод шельфовых морских акваторий | 75 |

| | |
|---|-----|
| 4.2 Основные черты циркуляции вод Одесского района и их влияние на перенос загрязняющих веществ от СБО | 94 |
| 4.3 Оценка вклада береговых антропогенных источников в эвтрофирование вод Днепровско-Бугского участка СЗЧМ..... | 113 |
| 4.3.1 Оценка вклада береговых источников с учетом только гидродинамического разбавления | 117 |
| 4.3.2 Оценка вклада береговых источников с учетом экосистемных процессов | 126 |
| 4.4 Влияние ливневого стока на качество вод Одесского района . | 145 |
| Заключение..... | 159 |
| Список литературы | 163 |

ВВЕДЕНИЕ

Северо-западная часть Чёрного моря (СЗЧМ) представляет собой обширную мелководную шельфовую зону, гидрологический и гидрохимический режим которой формируется под влиянием речного стока Дуная, Днестра, Днестра и Южного Буга. Ежегодно с речными водами в морскую среду поступает 653 тыс. тонн взвешенных веществ, более 8 тыс. тонн органических веществ, около 1,9 тыс. тонн азота и 1,2 тыс. тонн фосфора [1].

Кроме речного стока на качество прибрежных вод экосистемы СЗЧМ значительное влияние оказывают сбросы сточных вод от коммунально-бытовых хозяйств и промышленных предприятий, расположенных в прибрежной зоне. Ежегодно коммунально-бытовыми предприятиями сбрасывается в Черное море более 33,8 тыс. тонн взвешенных веществ, 8,8 тыс. тонн азота, 2,6 тыс. тонн фосфора, 24,1 тыс. тонн нефтепродуктов [1].

Существенными источниками загрязнения морской среды являются также стоки с сельскохозяйственных угодий и ирригационных систем, хозяйственной деятельности в портах, поверхностный сток с территории населенных пунктов и поступление в морскую среду коллекторно-дренажных вод. Последние два источника загрязнения являются эпизодическими и характеризуются значительной изменчивостью качества сточных вод.

Все вышеперечисленные источники влияют на состояние экосистемы СЗЧМ. Значительное превышение количества загрязняющих веществ над ассимилирующей способностью морской экосистемы приводит к развитию процесса эвтрофикации, химическому и микробиологическому загрязнению морских вод, потере биологических видов, сокращению рыбных ресурсов, снижению качества рекреационных ресурсов.

При разработке стратегии сохранения и улучшения качества вод исследуемой акватории необходима оценка роли каждого источника загрязнения.

Одним из районов Черного моря, где береговые антропогенные источники оказывают существенное влияние на качество морских вод, является акватория, которая непосредственно примыкает к Одесскому конгломерату. К этому району, называемому Одесским, относится часть акватории СЗЧМ ограниченная с запада и севера береговой чертой, а с востока и юга траверсами Сухого и Григорьевского

(Аджалыкского) лиманов. Эта акватория выделена как отдельный район в работах [2, 3].

Если за южную границу района принять линию, расположенную на широте $46^{\circ}18'$ с.ш., а за восточную – на долготе $31^{\circ}03'$ в.д., то площадь этой акватории составит около 550 км^2 . Максимальная глубина – 26 м. Изобата 10 м пролегает в среднем на расстоянии 1 км от береговой черты на участке между Сухим лиманом и мысом Ланжерон, а также на расстоянии 1,5 км – на участке между мысом Северный Одесский и Григорьевским лиманом. Изобата 20 м располагается на расстоянии 2 – 3 км от береговой черты. Самой мелководной зоной акватории является Одесский залив, средняя глубина которого составляет около 8 м. Наименьшие глубины в нем наблюдаются в районе между Нефтегаванью и мысом Северный Одесский (в среднем 5 м) [2].

Город Одесса образует главные «морские ворота» страны и представляет собой развитый портово-промышленный комплекс. В связи с ростом объема морских перевозок, в середине 70-х годов XX ст. были созданы два порта: Ильичевск (Сухой лиман) в 30 км юго-западнее Одессы и Южный (Григорьевский лиман) в 25 км северо-восточнее Одессы. В Ильичевске функционируют рыбный и торговый порты. В Григорьевском лимане расположены причалы Одесского припортового завода и ряда компаний. Все это свидетельствует о наличии на побережье исследуемого района антропогенных источников загрязнения морской среды, оказывающих значительное влияние на экологическую ситуацию в исследуемой акватории.

Кроме береговых антропогенных источников, на качество морских вод Одесского района большое влияние оказывает сток трансформированных речных вод, поступающих из Днестра, Южного Буга и в меньшей степени Днестра.

Побережье Одесского района является пляжной и санаторно-курортной зоной, где расположено большое количество здравниц и детских оздоровительных учреждений, поэтому указанный район имеет важное рекреационное значение.

К этому району примыкает также Одесская банка – ценный рыбохозяйственный участок Черного моря, где осуществляется воспроизводство рыбных ресурсов.

Актуальность оценки степени влияния береговых антропогенных источников загрязнения на качество морских вод Одесского района состоит в том, что она является одним из основных факторов выбора стратегии управления рекреационными и биологическими ресурсами исследуемой акватории. Эффективность реализации природоохранных мероприятий на региональном уровне, включая

нормирование сбросов загрязненных сточных вод и увеличение степени их очистки, в первую очередь, определяется правильностью ранжирования береговых антропогенных источников по степени их влияния на качество вод и экологическую ситуацию в исследуемой акватории.

ГЛАВА 1

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКВАТОРИИ ОДЕССКОГО РАЙОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

1.1 Гидрометеорологический и гидрологический режимы

Описанию гидрологического режима всей северо-западной части Черного моря и Одесского района, в частности, посвящено большое количество научной литературы, основанной на материалах многолетних исследований, выполненных в различных научно-исследовательских институтах, и многолетних наблюдений на сети береговых гидрометеорологических станций [2 – 10].

Главной особенностью всей северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) и ее Одесского района в частности, является значительная короткопериодная и сезонная изменчивость гидрологического режима, связанная с особенностями географического местоположения и климатическими условиями, влиянием речного стока Днепра, Южного Буга и систематическим развитием ветрового прибрежного апвеллинга [2, 3, 5].

По климатическим данным г. Одесса относится к степной зоне с умеренно континентальным климатом.

Среднегодовая температура воздуха г. Одессы за период 1894 – 2002 гг. составила 10,1 °С, а для зимнего (декабрь – февраль) и летнего (июнь – август) периодов, соответственно, – 0,8 °С и 21,1 °С [11].

Среднемесячная температура июля – 22,4 °С. Абсолютный максимум температуры воздуха – 38,0 °С. Январская среднемесячная температура воздуха в пределах региона составляет – 1,7 °С. Абсолютный минимум температуры – минус 29 °С. Среднегодовая амплитуда температуры около 25 °С. Продолжительность безморозного периода составляет 180 – 210 дней.

Минимальная температура морской воды по данным ГМС Одесса-порт (табл. 1.1) наблюдается в феврале и составляет 1,2 °С. Начиная с марта вода постепенно прогревается и ее температура достигает максимальных значений в августе. В летнее время вода у берега холоднее, чем в открытой части моря, что связано с ветровым апвеллингом при сгонных ветрах [12, 13]. Начиная с сентября, вода

постепенно охлаждается до конца февраля, когда ее температура достигает минимальных значений.

Таблица 1.1 – Средняя месячная температура поверхностных прибрежных вод по данным ГМС Одесса-порт, °С, за период 1962 – 2002 гг. [11]

| Месяц | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| 2,0 | 1,2 | 2,8 | 7,7 | 14,0 | 17,8 | 20,0 | 20,5 | 18,2 | 14,1 | 9,0 | 4,6 |

Изменчивость солености вод исследуемого района (табл. 1.2) связана с влиянием речного стока Днепра и Южного Буга. Минимальные значения солености наблюдаются в мае (12,96 ‰), а максимальные (15,74 ‰) – в июле - августе.

Таблица 1.2 – Средняя месячная соленость поверхностных вод по данным ГМС Одесса-порт, ‰, за период 1948 – 2002 гг. [11]

| Месяц | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| 15,05 | 14,43 | 13,90 | 13,09 | 12,96 | 14,25 | 15,74 | 15,74 | 15,72 | 15,27 | 14,80 | 15,07 |

На акватории СЗЧМ существует постоянная фоновая циркуляция вод циклонического характера (Основной черноморский поток) со скоростью, не превышающей 0,3 м/с. Одним из основных физических факторов, определяющих короткопериодную и синоптическую изменчивость циркуляции вод исследуемого района, является ветер.

Над акваторией Черного моря преобладают ветры северо-западного, западного и юго-западного направлений, связанные с особенностями атмосферной циркуляции [14, 15]. В холодное полугодие, когда усиливается циклоническая деятельность над Средиземным морем и часто формируется стационарный антициклон над Восточной Европой, в районе Черного моря, и особенно в северной и западной его частях, возникают северо-восточные ветры. В переходные сезоны, когда циклоны полярного фронта проходят над территорией Болгарии или немного севернее, создаются условия благоприятные для возникновения юго-восточных и восточных ветров. В летние месяцы на побережье возникает бризовая циркуляция – днем ветры дуют с моря на сушу, ночью – с суши на море.

По данным ГМС Одесса-порт, в районе Одессы наибольшую повторяемость имеет ветер западного направления (22,5 %) [13, 15].

Ветра северного, северо-западного и южного направлений имеют практически одинаковую повторяемость (около 14 %). Суммарная повторяемость ветров северных румбов в течение всего года составляет 34,6 % (табл. 1.3). Преобладание ветров северных направлений наиболее выражено в зимний и летний периоды с повторяемостью, соответственно, 37,8 % и 34,8 %. Для весеннего периода (март – май) характерно постепенное уменьшение северо-восточного, северного и северо-западного переносов и усиление влияния ветров южного и юго-восточного направлений.

Таблица 1.3 – Повторяемость направления ветра (%) по данным ГМС Одесса-порт, среднее за 1981 – 2000 гг. [15]

| Месяц | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
|-------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|
| I | 17,7 | 6,6 | 9,8 | 4,1 | 11,5 | 4,4 | 30,1 | 15,8 |
| II | 13,7 | 7,8 | 15,8 | 8,7 | 12,6 | 3,1 | 23,7 | 14,6 |
| III | 18,0 | 9,2 | 13,9 | 12,9 | 13,6 | 2,7 | 18,3 | 11,4 |
| IV | 11,9 | 5,8 | 15,1 | 20,1 | 16,4 | 2,9 | 17,2 | 10,6 |
| V | 10,5 | 3,9 | 12,5 | 23,0 | 18,6 | 3,5 | 16,9 | 11,1 |
| VI | 10,9 | 3,1 | 8,2 | 19,1 | 15,9 | 3,9 | 23,1 | 15,8 |
| VII | 14,1 | 2,0 | 5,6 | 15,3 | 11,8 | 2,8 | 27,7 | 20,7 |
| VIII | 14,7 | 3,5 | 7,5 | 14,7 | 12,1 | 3,8 | 24,3 | 19,4 |
| IX | 12,6 | 3,7 | 11,1 | 13,7 | 17,6 | 3,6 | 23,3 | 14,4 |
| X | 16,5 | 7,6 | 13,0 | 10,4 | 15,8 | 3,3 | 19,5 | 13,9 |
| XI | 15,5 | 8,6 | 18,1 | 8,5 | 12,5 | 3,5 | 20,5 | 12,8 |
| XII | 17,8 | 7,1 | 11,5 | 6,5 | 14,5 | 5,0 | 25,3 | 12,3 |
| Год | 14,5 | 5,7 | 11,9 | 13,1 | 14,4 | 3,5 | 22,5 | 14,4 |

Летом южные ветры имеют примерно одинаковую повторяемость с северными и северо-западными ветрами. Осенью увеличивается повторяемость северного и северо-восточного ветров.

В районе Одессы наблюдаются довольно значительные скорости ветров. Среднегодовая скорость ветра по данным станции Одесса-порт составляет 4,6 м/с (табл. 1.4).

Ветры северного, северо-восточного и восточного направлений способствуют формированию постоянного циклонического потока вод на акватории СЗЧМ, усиливая его интенсивность. Ветры противоположных румбов, наоборот, ослабляют этот поток. При длительном воздействии они могут вызывать обратную, т.е. антициклоническую циркуляцию. Скорость ветровых течений достигает 0,5 м/с.

Таблица 1.4 – Средняя месячная и годовая скорость ветра (м/с) за период 1981 – 2000 гг. для ГМС Одесса-порт и за 1961 – 1990 гг. для ГМС Одесса-обсерватория [16, 17]

| Станция | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Год |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Одесса-порт | 4,8 | 4,7 | 5,0 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,2 | 4,0 | 4,4 | 4,9 | 5,6 | 4,9 | 4,6 |
| Одесса - обсерватория | 4,6 | 4,6 | 4,3 | 3,8 | 3,4 | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,9 | 4,3 | 4,3 | 3,9 |

В исследуемом районе отмечается также, обусловленная ветром и наличием берегов, послойная циркуляция вод, которая чаще всего характеризуется разнонаправленными перемещениями в 10-метровом поверхностном и глубинном слоях. В прибрежных районах моря часто наблюдаются сгонно-нагонные явления, которые, накладываясь на определяемую ветром вдольбереговую циркуляцию и фоновую циклоническую циркуляцию, создают сложную картину динамики вод, как во времени, так и в пространстве.

Динамика вод акватории в различные гидрологические сезоны имеет свои характерные особенности. Так, в весенний сезон сильное влияние оказывает сток распресненных вод, поступающих из Днепровско-Бугского лимана [18]. По данным ГМС Одесса-порт ежегодно в мае отмечаются случаи подхода сильно распресненных вод (до 3 ‰) в район Одессы. При этом вынос пресных вод увеличивает скорость вдольберегового потока до 0,4 м/с. Для весеннего периода характерно постепенное уменьшение ветров северо-восточного и северного направлений и усиление влияния ветров западных и южных румбов, которые нередко препятствуют поступлению к побережью Одессы распресненных вод. Весенний прогрев поверхностного слоя воды ведет к формированию температурной стратификации. Наличие температурной стратификации и присутствие на поверхности распресненных вод затрудняют в этот сезон вертикальный обмен.

Для летнего периода характерно общее ослабление интенсивности переноса водных масс. Все направления ветра в этот период примерно равновероятны. В августе, в качестве преобладающего, можно выделить северо-западное направление ветра (табл. 1.3). Вертикальный турбулентный и диффузионный обмен в этот период затруднены из-за ярко выраженной стратификации вод. В то же время, летом нередко отмечаются сгонно-нагонные явления.

В летний период значительно снижается объем пресных вод, поступающих из Днепровско-Бугского лимана, в результате чего происходит постепенное повышение солености вод поверхностного слоя и ослабление вертикальной стратификации. В начале июня в районе мыса Северный Одесский может прослеживаться остаточный язык распресненной воды соленостью ниже 13 ‰, остальное пространство занято водой соленостью от 13 до 14 ‰. За 10-ти метровой изобатой соленость вод придонного слоя больше 16 ‰. Температура воды в придонном слое около 5 – 6 °С, в то время как на поверхности она составляет 16 – 17 °С. В дальнейшем, с постепенным прогревом температура поверхностного слоя воды растет, достигая своего максимума в августе. В условиях длительного безветрия температура воды на поверхности достигает 24 – 26 °С. На мелководье вода хорошо прогрета от поверхности до дна. Слой скачка температур располагается на глубине 9 – 11 м. Температура у дна колеблется в пределах 7 – 10 °С. Соленость поверхностного слоя находится в интервале 14 – 16,8 ‰, придонного слоя 14,5 – 17,7 ‰ [19].

Летом, при доминировании сгонных северных, северо-западных и западных ветров, в прибрежной зоне Одесского района развивается прибрежный апвеллинг. Во время сгона прогретая вода поверхностного слоя отгоняется дрейфовыми течениями от берега в сторону открытого моря, а ее место, в результате компенсационного подтока, занимает холодная и соленая вода из придонного слоя. Обычно это явление имеет локальный характер, но иногда может охватывать все побережье [3].

Охлаждение верхнего прогретого слоя и разрушение слоя скачка плотности в осенний период способствует активному конвективному обмену между поверхностным и придонным слоями. В этот же период увеличивается повторяемость северного и северо-восточного ветров, активизирующих как вертикальный обмен вод, так и фоновую горизонтальную циклоническую циркуляцию.

В зимний период, при полной вертикальной и значительной горизонтальной изотермии и изохалинности, процессы перемещения вод проходят еще активнее. В этот период акватория находится под преобладающим влиянием северного и северо-восточного ветров. Однако при наличии в холодные зимы ледового покрова, воздействие ветра исключается и основную роль в формировании циркуляции вод играет постоянный Основной черноморский поток.

1.2 Характеристика современного экологического состояния вод исследуемого района

Начиная с 70-х годов прошлого столетия, большое внимание уделяется мониторингу за состоянием качества вод СЗЧМ. Различными природоохранными и научно-исследовательскими организациями проводится идентификация антропогенных источников загрязнения и мониторинг степени загрязнения сбросных вод, поступающих в морскую среду.

Районированию акватории СЗЧМ по различным океанологическим факторам посвящен целый ряд работ. Так, районирование по гидробиотическому признаку выполнено в работе [20], где учитывается своеобразие гидрологического и гидрохимического режимов, особенности состава, структуры и распределения фитоценозов, продуктивность макрофитов. На основе совместного учета гидрофизических и гидрохимических характеристик выполнено районирование СЗЧМ в работе [21]. В [22] выполнено районирование СЗЧМ с привлечением информации о процессах, протекающих на границе вода – донные отложения. В указанных работах Одесский район выделен как отдельный участок СЗЧМ, характеризующийся специфическими гидрофизическими, гидрохимическими и гидробиологическими процессами.

Экологический мониторинг Одесского района проводится различными научно-исследовательскими и природоохранными организациями, в числе которых Одесский филиал Института биологии южных морей НАН Украины (ОФ ИнБЮМ), Украинский научный центр экологии моря (УкрНЦЭМ), Государственная экологическая инспекция по охране северо-западного региона Черного моря и др. Результаты мониторинга опубликованы в различных научно-технических отчетах и статьях.

Как показали результаты мониторинга, проводимого Государственной экологической инспекцией по охране северо-западного региона Черного моря [23, 24, 25, 26], объем загрязняющих веществ антропогенного происхождения, поступающий в Черное море от береговых источников загрязнения, составляет около 10 – 15 % от общего количества загрязняющих веществ, поступающих в морскую среду. Загрязнение формируется под воздействием стационарных и диффузионных источников загрязнения: сбросы возвратных вод от промышленных предприятий, стоки с сельскохозяйственных угодий и

ирригационных систем, сбросы муниципальных очистных сооружений, хозяйственная деятельность в портах, судоходство. Отмечено что, основным загрязнителем морской среды являются нефтепродукты, концентрация которых в прибрежной зоне может превышать ПДК.

По данным экологического мониторинга ОФ ИнБЮМ [2, 3] гидрохимический режим Одесского района характеризуется избыточным содержанием биогенных веществ (углерода, азота и фосфора), на порядок превышающим их среднее содержание в водах Черного моря. Степень загрязненности вод исследуемого района, характеризующаяся отношением величин ХПК/БПК₅, указывает на преобладание в водах органических веществ антропогенного происхождения, деструкция которых затруднена. Доминирующим видом загрязняющих веществ Одесского района являются нефтепродукты, максимальные концентрации которых зафиксированы в зонах влияния основного вдольберегового потока и Одесского порта. Воды района хронически загрязнены цинком и ртутью, максимальные концентрации которых также зафиксированы в зонах непосредственного влияния основных источников загрязнения исследуемого района. Уровень загрязнения донных отложений является следствием хронического загрязнения вод, замедленного водообмена, а также наличия большого количества взвешенных веществ органического и минерального происхождения, что увеличивает перенос загрязняющих веществ из воды в донные отложения.

Особенности гидрометеорологического режима и высокий уровень трофности вод района, складывающийся в результате совокупного действия речного стока и местных источников биогенных и загрязняющих веществ, приводят к формированию неблагоприятной экотоксикологической обстановки [19]. Отмечается летний дефицит кислорода в придонном слое, снижение окислительной активности и способности вод к самоочищению. В связи с этим, в воде и донных отложениях происходит накопление загрязняющих веществ до экологически опасных уровней и нарушается функционирование экосистемы.

Проникновение языка распресненных вод из Днепровско-Бугского лимана весной и прибрежный ветровой апвеллинг в весенне-летний период года существенно влияют на текущее пространственное распределение гидрохимических и гидробиологических характеристик вод и его изменчивость в исследуемом районе [13]. Развитие этих явлений сопровождается поступлением в Одесский район дополнительных количеств

биогенных и органических веществ, способствующих углублению процесса эвтрофирования вод и развитию гипоксии в прибрежной зоне.

По результатам гидрохимического мониторинга, проведенного в портах Одесса, Южный, Ильичевск отмечено, что в отдельных гаванях Одесского порта наблюдается увеличение содержания нитратов и фосфатов, бактериального загрязнения воды (по БПК₅), а также снижение содержания растворенного кислорода в водной толще [27]. Такое изменение состояния водной среды связывается с антропогенным воздействием на качество вод хозяйственной деятельности порта. В бассейнах с пониженным водообменом, к которым относятся и акватории указанных портов, имеются условия для накопления различных загрязняющих веществ в донных отложениях, которые в свою очередь, являются источниками «вторичного» загрязнения морской среды.

Результаты биотестирования вод Одесского залива, проведенного ОФ ИнБЮМ [3], позволили выявить участки акватории, на которых природная морская вода периодически или постоянно обладает токсическими свойствами. К таким «горячим точкам» относятся: район аварийного выпуска Аркадийского ливневого коллектора, Нефтяная гавань Одесского порта, участок на траверсе Малого Аджалыкского лимана, район выпуска и рассеивания сточных вод СБО «Южная». Гиперэвтрофными, по результатам аьготестов, признаны участки акватории Одесского порта с затрудненным водообменом, вблизи точечных источников загрязнения: выпуск Деволановского аварийного коллектора в Практической гавани, сброс неочищенного стока в Хлебной гавани, выпуски Одесской теплоэлектроцентрали и станции очистки балластных вод.

По данным мониторинга, проводимого Одесской городской санитарно-эпидемиологической станцией [28, 29], основной показатель бактериальной загрязненности морской воды (индекс ЛКП), более чем в 50 раз превышает ПДК в прибрежной зоне моря. Так, морская вода пляжа «Лузановка», где расположен детский оздоровительный центр «Молодая гвардия», имеет показатели бактериального загрязнения по индексу ЛКП до 240 тыс. микробных тел на литр воды, при норме не более 5 тыс. Из морской воды постоянно выделяются энтеровирусы гепатита А и ротавирусы. Поэтому санэпидслужбой города выносятся постановления о запрещении морского водопользования на всех городских пляжах. Такая ситуация связывается с отсутствием в цикле водообработки на городских очистных сооружениях обеззараживания сточных вод

перед сбросом их в море, а также со сбросами ливневых вод с территории города через основные ливневыпуски.

На неудовлетворительное состояние городских пляжей указывают также результаты мониторинга, проведенного ОФ ИнБЮМ [2]. Акватории портов Одесса и Южный, пляжей «Лузановка» и «Ланжерон» можно отнести к районам хронического загрязнения, поскольку в этих районах отмечается повышенное содержание нефтепродуктов, фенолов и пестицидов. В водах пляжей Б. Фонтана отмечено повышенное, по сравнению с другими пляжами, содержание СПАВ. В меньшей степени испытывают антропогенную нагрузку акватории пляжей «Дельфин» и «Отрада».

На неудовлетворительное состояние вод Одесского района указывается в работе [30], где отмечено, что в связи с наличием большого количества антропогенных источников, в районе наблюдается высокий уровень эвтрофикации вод, повышенное содержание биогенных веществ и нефтепродуктов в воде и донных отложениях. Такая ситуация приводит к снижению окислительной способности морских вод, деградации процессов их естественного самоочищения. В летний период в регионе фиксируются явления гипоксии и, как следствие, массовые заморы.

В работах [3, 10] указано, что к основным береговым источникам загрязнения вод Одесского региона относятся городские станции биологической очистки, дренажные системы коллекторов противооползневых сооружений, ливнестоки. Отмечено, что вклад указанных источников загрязнения составляет до 30 % от общего загрязнения прибрежных вод г. Одессы [3].

По мнению авторов [31], значительная антропогенная нагрузка в Одесском районе обусловлена высокой плотностью населения, которая составляет для г. Одессы 344 чел/км², а также высоким уровнем хозяйственного освоения прибрежной территории и низким обеспечением соблюдения природоохранных требований и правил.

Результаты анализа комплексных исследований в зоне I и II очереди берегозащитного строительства в г.Одессе приведены в работе [32]. Поступление биогенных веществ со стоком дренажных вод в прибрежную зону вызывает повышение концентрации питательных солей и способствует развитию микрофитов и макрофитов. Это приводит к образованию дополнительного количества органического вещества в прибрежной зоне моря. Отмечено, также, что влияние дренажного стока на качество среды и экосистемы прибрежных пляжных бассейнов неоднозначно: с одной стороны, высокое содержание минеральных форм азота стимулирует эвтрофикацию, повышая опасность вторичного загрязнения

вегетирующими водорослями, с другой – поступающие в прибрежную зону воды приводят к существенному перемешиванию, обогащению водной среды кислородом, разбавлению бактериального загрязнения, повышению биологического разнообразия. Основными факторами, определяющими ухудшение качества морской среды у одесского побережья, является избыточное накопление органического вещества и бактериальное загрязнение. Содержание нефтепродуктов, цинка и ртути усугубляет негативную экотоксикологическую обстановку в прибрежной зоне. Качество вод в бассейнах определяется главным образом скоростью химико-биологических процессов, протекающих в экосистеме.

Характеристика гидрологических и морфологических условий Одесского залива, пространственной и сезонной изменчивости основных гидрохимических параметров и уровня загрязнения, а также основные тенденции современной эволюции его экосистемы приведены в работе [33]. Также в указанной работе приведен химический и микробиологический состав ливневых вод, поступающих в морскую среду от основных городских ливневыпусков. Результаты исследований свидетельствуют, что вследствие особенностей гидрологии района, высокого уровня фонового загрязнения, снижения способности вод к самоочищению от органических загрязняющих веществ, а также общей тенденции к деградации экосистемы, выпуск неочищенных ливневых вод в море в пределах Одесского залива в настоящее время недопустим. Сделан вывод о том, что сбросу ливневых вод в море должна предшествовать глубокая очистка и дезинфекция.

ГЛАВА 2

ХАРАКТЕРИСТИКА АНТРОПОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АКВАТОРИИ ОДЕССКОГО РАЙОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Качество морских вод в акватории Одесского района северо-западной части Черного моря определяется, с одной стороны, поступлением загрязняющих веществ с речным стоком Днепра, Южного Буга и Днестра, а, с другой стороны, сбросом загрязненных стоков от береговых источников в прибрежную зону. В результате вышеуказанных факторов в морскую среду поступает значительное количество биогенных веществ, способствующих развитию процесса эвтрофикации, и, как следствие, изменению гидрохимического режима вод акватории и ухудшению ее рекреационных свойств. Кроме того, в исследуемом районе систематически возникают гипоксийно-аноксийные явления в придонном слое в весенне-летний период года, приводящие к резкому ухудшению условий обитания и гибели высших гидробионтов.

К основным береговым антропогенным источникам загрязнения морской среды Одесского региона (рис. 2.1) могут быть отнесены:

- хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды, поступающие с городских очистных сооружений;
- ливневые стоки;
- дренажные стоки;
- индустриальные стоки предприятий, осуществляющих непосредственный сброс в акваторию Черного моря.

2.1 Станции биологической очистки сточных вод г. Одессы

В г.Одессе функционируют две станции биологической очистки (СБО) сточных вод: «Северная», расположенная в районе Пересыпи, и СБО «Южная», расположенная в районе Дачи Ковалевского. СБО предназначены для очистки производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих от населения и предприятий города.

На СБО «Южная» поступают стоки южной части города Одессы. Этот район, в основном, является селитебным. Сброс очищенных стоков с СБО «Южная» осуществляется через рассеивающий выпуск в акваторию Черного моря на расстоянии 2,12 км от берега, на глубине 18,2 м.

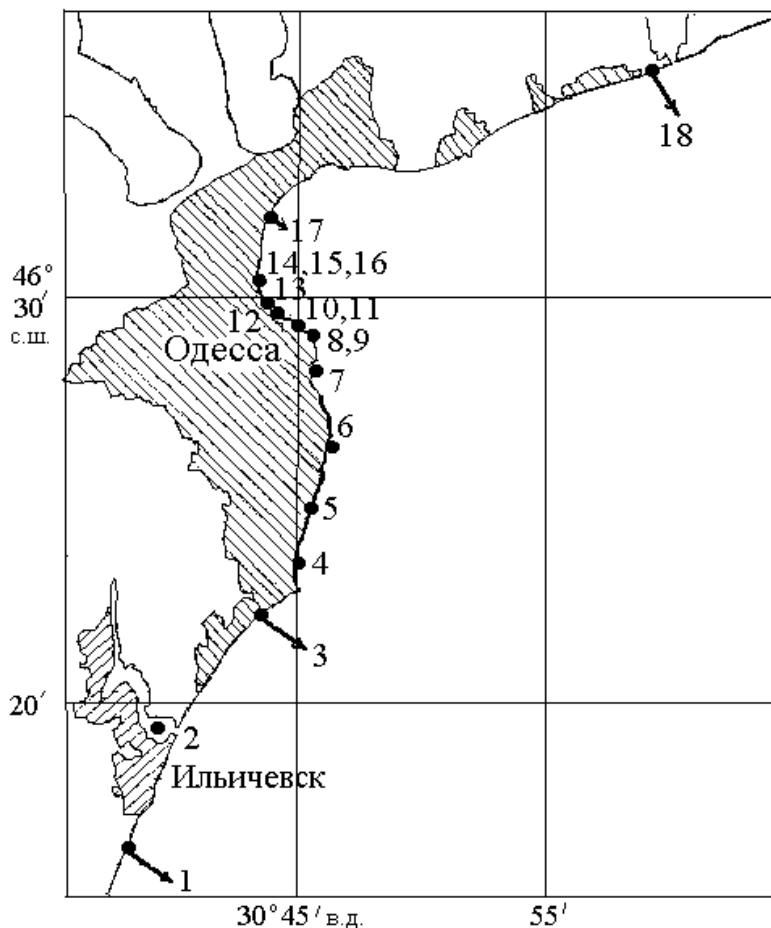


Рис. 2.1 – Основные антропогенные источники загрязнения морской среды Одесского района [34]:

1 – Ильичевский морской торговый порт (ИМТП); 2 – Портовый холодильник ИМТП; 3 – станция биологической очистки (СБО) «Южная»; 4 – ливневыпуск 16 ст. Б.Фонтана; 5 – ливневыпуск 10 ст. Б. Фонтана; 6 – ливневыпуск «Аркадия»; 7 – Деволановский ливневыпуск; 8 – Платоновский ливневыпуск; 9 – портовый холодильник; 10 – СРЗ «Украина»; 11 – морвокзал Одесского порта; 12 – Андросовский ливневыпуск; 13 – ливневыпуски 1 и 2 Заливных переулков; 14 – ЗАО «Одесская сахарная компания»; 15 – «Синтез-Ойл»; 16 – Одесская теплоэлектростанция; 17 – СБО «Северная»; 18 – Одесский припортовый завод. Жирной линией выделен участок береговой полосы, оборудованный дренажными выпусками.

На СБО «Северная» поступают стоки центральной, северной части города, в том числе жилого массива Котовского. В этом районе расположено значительное количество промышленных предприятий, что в свою очередь оказывает влияние на качество поступающих на очистные сооружения сточных вод. СБО «Северная» осуществляет сброс стоков в Черное море только в зимний период года (середина октября – конец апреля) через сбросной канал на расстоянии 300 м от берега на глубине 3,6 м, а в летний период года (конец апреля – середина октября) через береговой выпуск в Хаджибейский лиман.

В экстремальных условиях по специальному разрешению региональных служб Министерства экологии и природных ресурсов Украины и Министерства охраны здоровья Украины могут быть разрешены аварийные выпуски в Черное море. Такая ситуация имеет место начиная с 2003 г. в случае подъема воды в Хаджибейском лимане и угрозы затопления прилегающей к нему территории.

Рассчитанная согласно [35], кратность начального разбавления для СБО «Южная» составляет 4,95 раз, а для СБО «Северная» - 5,43. Длина участка начального разбавления равна 18 м для СБО «Южная» и 109,1 м для СБО «Северная».

Проектная производительность СБО «Северная» составляет 146 млн. м³/год, а СБО «Южная» - 73 млн. м³/год.

Очистка смешанного хозяйственно-бытового и производственного стока на СБО «Северная» и «Южная» осуществляется механическими и биологическими методами.

Сточные воды по напорному трубопроводу поступают в приемную камеру, последовательно проходят песколовку, первичный радиальный отстойник и направляются на биологическую очистку, которая осуществляется в контактно-стабилизационных аэротенках на СБО «Северная» и четырехкоридорных аэротенках на СБО «Южная».

После полной биологической очистки сточная вода переходит во вторичный радиальный отстойник, из которого она отводится в водный объект по сбросному трубопроводу.

Песколовки предназначены для частичного усреднения расхода сточных вод, задержания минеральных примесей крупностью 0,20 – 0,25 мм.

В первичных радиальных отстойниках осуществляется предварительное осветление сточных вод, выделение взвешенных крупнодисперсных частиц.

Процесс полной биологической очистки на СБО «Северная» протекает в контактно-стабилизационном аэротенке в две стадии: первая стадия – в камере контакта сорбция загрязняющих веществ из

сточных вод активным илом; вторая стадия – в камере стабилизации окисление извлеченных загрязнителей микроорганизмами-биодеструкторами на поверхности активного ила. Продолжительность стадии контакта составляет 0,8 - 1 ч, стадии стабилизации – 4 - 5 ч.

По отношению к обычному аэротенку, контактно-стабилизационный обладает рядом преимуществ и недостатков. Преимущество заключается в меньшем объеме сооружения, поскольку сточная вода после взаимодействия с активным илом сбрасывается во вторичный отстойник и не участвует в процессе биодеструкции загрязняющих веществ в камере стабилизации. Недостаток состоит в отсутствии полного извлечения загрязняющих веществ активным илом в период контакта из-за кратковременности взаимодействия, что снижает эффективность процесса очистки.

Процесс полной биологической очистки на СБО «Южная» проводится в четырехкоридорном аэротенке-вытеснителе. Сточная вода подводится в аэротенк через распределительную систему сверху. Циркулирующий активный ил подается в начало первого коридора. Аэротенки-вытеснители обладают следующими преимуществами:

- исключение влияния залповых сбросов загрязнителей путем отведения их в отдельные секции;
- разделение (недопущение смешения) потоков очищенных и грязных сточных вод.

Недостатком сооружений является недостаточно высокая степень рециркуляции активного ила, что сказывается на эффективности процесса очистки.

На обеих станциях во вторичных радиальных отстойниках протекают процессы осветления сточной воды, отделение активного ила, взвешенных веществ. Время процесса отстоя – не менее двух часов.

Осадки, избыточный активный ил, образующийся в результате осуществления процессов очистки, вывозятся на иловые площадки.

Динамика поступления сточных вод на СБО «Северная» и «Южная» взята из «Проекта предельно допустимых сбросов загрязняющих веществ, отводимых с возвратными водами предприятий Одесводоканала во внутренние морские воды Черного моря и реку Днестр» (1996, 2006 гг.) и представлена на рис. 2.2.

Как видно из приведенной диаграммы, количество сточных вод, поступающих на очистные сооружения, ниже проектных для СБО «Северная» в среднем на 33 %, для СБО «Южная» - на 28 %. В период 2000– 2008 гг. отмечается тенденция к уменьшению объемов сточных вод, поступающих на очистные сооружения. Это связано, прежде всего, с реализацией мероприятий по рациональному использованию

водных ресурсов на предприятиях, строгим контролем расхода свежей воды питьевого качества на предприятиях и в жилых домах.

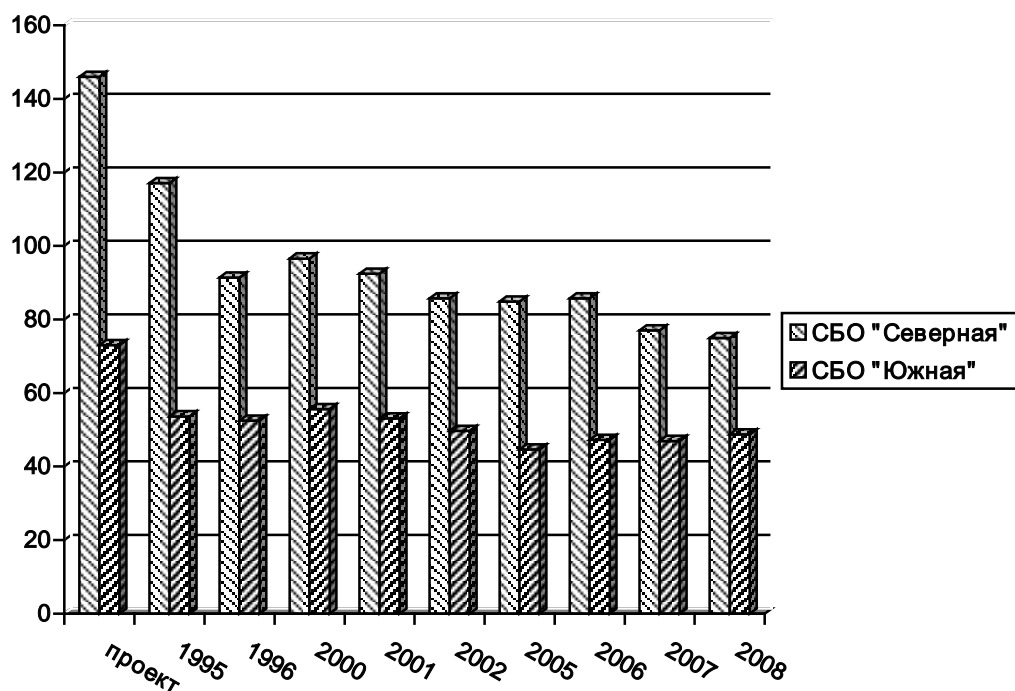


Рис. 2.2 – Проектные и реальные годовые объемы сточных вод, поступающих на очистные сооружения, млн. м³/год.

С марта 1995 г. на СБО «Южная» была введена в действие биологическая ступень очистки. Качественная характеристика сбрасываемых стоков до и после ввода в действие биологической ступени очистки представлена в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристика сбрасываемых сточных вод до (1994 г.) и после (1995, 1997 и 2001 гг.) ввода биологической ступени очистки стоков на СБО «Южная»

| Показатель | Концентрация, мг/дм ³ | | | |
|------------------|----------------------------------|---------|---------|---------|
| | 1994 г. | 1995 г. | 1997 г. | 2001 г. |
| Азот аммонийный | 17,9 | 12,5 | 7,68 | 3,09 |
| Нитриты | 0,044 | 0,12 | 0,72 | 0,2 |
| Нитраты | 0,06 | 0,24 | 0,45 | 5,98 |
| БПК ₅ | 72,2 | 34 | 6,2 | 10,2 |
| Перманг. окисл. | 28,3 | 13,4 | 7,48 | 9,91 |
| ХПК | 117 | 160 | 79,6 | 61,5 |
| Нефтепродукты | 0,133 | 0,08 | 0,026 | 0,028 |

Как видно из приведенных данных, ввод в действие биологической ступени очистки позволил снизить концентрации азота аммонийного более чем в 5 раз, нефтепродуктов – в 4 раза, показателей БПК₅ – в 7 раз и ХПК в 2 раза. Однако концентрация нитритов на выходе из очистных сооружений возросла в 4 раза, а нитратов – в 100 раз.

Качественная характеристика сточных вод, поступающих на очистные сооружения и сбрасываемых в Черное море после очистки в 2000 – 2008 гг., представлена в табл. 2.2, 2.3.

Для сбрасываемых сточных вод СБО «Северная» прослеживается тенденция к увеличению концентраций всех нормируемых показателей, в частности, увеличилась величина БПК_{полн} (в 2,3 раза) и концентрации азотсодержащих соединений, а именно: азота аммонийного – в 3,9 раза, азота нитритного – в 3,4 раза и азота нитратного – в 2,1 раза. Содержание фосфатов в сточных водах, сбрасываемых в море после очистки, увеличилось в 1,2 раза.

Для СБО «Южная» отмечается незначительное снижение БПК_{полн}, ХПК, перманганатной окисляемости и концентрации азота нитратного – в среднем в 1,1 раза. Для соединений азота аммонийного, азота нитритного и фосфатов наблюдается повышение концентраций – в среднем в 1,4 раза.

Эффективность очистки сточных вод от азота аммонийного на очистных сооружениях составляет в среднем 72 %, а для неорганических соединений фосфора – в среднем 61 %. По бактериологическим показателям на выходе с очистных сооружений сточные воды характеризуются значительным содержанием бактерий группы кишечной палочки, что связано с высоким бактериальным загрязнением на входе на очистные сооружения и отсутствием обеззараживания сбрасываемых в море очищенных стоков.

Количественный состав сточных вод, сбрасываемых СБО «Северная» и «Южная» в Черное море за период 2000 – 2008 гг., представлен в табл. 2.4 и 2.5.

По данным Госинспекции по охране северо-западной части Черного моря [36], качество сбрасываемой очищенной воды с СБО «Северная» в 2002г. не отвечала согласованным нормативам предельно допустимых сбросов. Вследствие чего очищенные возвратные воды СБО «Северная» после очистных сооружений переведены из категории нормативно очищенных в категорию недостаточно очищенных.

Таблица 2.2 – Показатели качества сточных вод на выходе с СБО «Северная» (данные ведомственной лаборатории КП «Одесводоканал»)

| Загрязняющее вещество, показатель | Средняя годовая концентрация, мг/дм ³ | | | | | | |
|-----------------------------------|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------|-------|
| | Год | | | | | | |
| | 2000 | 2001 | 2002 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
| Взвешенные вещества | 4,00 | 4,17 | 5,42 | 10,42 | 11,17 | 12,0 | 12,0 |
| БПК ₅ | 3,68 | 3,91 | 5,64 | 8,28 | 9,23 | 9,1 | 10,1 |
| ХПК | 60,8 | 59,7 | 71,5 | 79,0 | 76,8 | 76,5 | 74,4 |
| Перманганатная окисляемость | 5,34 | 5,21 | 6,8 | 8,5 | 9,03 | 8,3 | 8,4 |
| Нефтепродукты | 0,048 | 0,050 | 0,050 | 0,047 | 0,043 | 0,033 | - |
| СПАВ | 0,046 | 0,048 | 0,055 | 0,024 | 0,029 | 0,039 | 0,030 |
| Азот аммонийный | 1,50 | 1,49 | 2,22 | 5,87 | 4,95 | 6,63 | 5,94 |
| Нитраты (по азоту) | 6,08 | 6,04 | 5,7 | 3,71 | 3,22 | 1,7 | 3,47 |
| Нитриты (по азоту) | 0,12 | 0,14 | 0,262 | 0,366 | 0,463 | 0,579 | 0,496 |
| Сухой остаток | 944,8 | 991,3 | 895,1 | 810 | 900,3 | 971 | 835 |
| Хлориды | 120,8 | 113,0 | 140,7 | 129,6 | 147,7 | - | 137,4 |
| Фосфаты | 3,8 | 3,9 | 5,5 | 4,63 | 4,06 | 2,4 | 3,2 |
| рН | 7,26 | 7,21 | 7,25 | 7,44 | 7,49 | 7,7 | 7,6 |
| Микробное число | $0,9 \cdot 10^5$ | $0,7 \cdot 10^5$ | $2,02 \cdot 10^4$ | $3,7 \cdot 10^4$ | $2,3 \cdot 10^4$ | - | - |
| Коли-индекс | $0,68 \cdot 10^8$ | $0,44 \cdot 10^8$ | $1,52 \cdot 10^7$ | $4,3 \cdot 10^7$ | $2,1 \cdot 10^7$ | - | - |
| Растворенный кислород | 3,0 | 3,1 | 3,5 | 4,1 | 4,4 | 5,2 | 5,4 |
| Железо общее | - | - | - | 0,165 | 0,032 | 0,05 | 0,08 |

Таблица 2.3 – Показатели качества сточных вод на выходе с СБО «Южная» (данные ведомственной лаборатории КП «Одесводоканал»)

| Загрязняющее вещество, показатель | Средняя годовая концентрация, мг/дм ³ | | | | | | |
|--------------------------------------|--|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|
| | Год | | | | | | |
| | 2000 | 2001 | 2002 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
| Взвешенные вещества | 8,92 | 9,28 | 9,00 | 11,87 | 15,08 | 14,8 | 17,2 |
| БПК ₅ | 7,52 | 10,12 | 11,60 | 10,18 | 9,95 | 7,03 | 9,3 |
| ХПК | 59,3 | 51,3 | 47,0 | 53,8 | 52,1 | 64,6 | 64,2 |
| Перманганатная окисляемость | 8,86 | 10,07 | 8,3 | 8,9 | 8,3 | 9,6 | 9,8 |
| Нефтепродукты | 0,052 | 0,029 | 0,053 | 0,041 | 0,048 | 0,02 | 0,02 |
| СПАВ | 0,048 | 0,058 | 0,08 | 0,065 | 0,058 | 0,05 | - |
| Азот аммонийный | 7,41 | 3,12 | 5,39 | 4,66 | 4,20 | 4,5 | 7,1 |
| Нитраты (по азоту) | 3,87 | 5,65 | 4,72 | 4,72 | 4,76 | 6,46 | 6,2 |
| Нитриты (по азоту) | 0,135 | 0,189 | 0,215 | 0,241 | 0,215 | 0,37 | 0,293 |
| Сухой остаток | 521,5 | 502,3 | 435 | 448,3 | 485,3 | 584 | 485,2 |
| Хлориды | 96,2 | 90,1 | 102,0 | - | - | - | 97,0 |
| Фосфаты | 2,13 | 4,35 | 4,20 | 5,04 | 6,31 | 7,76 | 8,8 |
| pH | 7,63 | 7,60 | 7,60 | 7,32 | 7,43 | 7,3 | 7,5 |
| Микробное число | $2,10 \cdot 10^4$ | $2,92 \cdot 10^4$ | $4,9 \cdot 10^4$ | $455 \cdot 10^2$ | $221 \cdot 10^2$ | - | - |
| Коли-индекс | $8,67 \cdot 10^7$ | $4,25 \cdot 10^7$ | $1,6 \cdot 10^7$ | $303 \cdot 10^4$ | $80 \cdot 10^4$ | - | - |
| Растворенный кислород | 7,0 | 7,2 | 7,3 | 9,8 | 9,2 | 7,6 | 6,9 |
| Железо общее | - | - | - | 0,098 | 0,125 | 0,083 | 0,18 |

Таблица 2.4 – Количество загрязняющих веществ, поступивших в морскую среду со сточными водами СБО «Северная»

| Загрязняющее вещество | Фактический сброс, т/год | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 2000 г. | 2001 г. | 2002 г. | 2005 г. | 2006 г. | 2007 г. | 2008 г. |
| Взвешенное вещество | 386,37 | 385,54 | 464,60 | 884,60 | 958,04 | 924,10 | 899,12 |
| БПК ₅ | 355,46 | 361,50 | 483,46 | 702,92 | 791,65 | 700,78 | 756,76 |
| ХПК | 5872,85 | 5519,62 | 6128,91 | 6706,64 | 6586,90 | 5891,17 | 5574,55 |
| Перманганатная окисляемость | 515,81 | 41,70 | 582,89 | 721,60 | 774,49 | 639,17 | 629,39 |
| Нефтепродукты | 4,64 | 4,62 | 4,29 | 3,99 | 3,69 | 2,54 | - |
| СПАВ | 4,44 | 4,44 | 4,80 | 2,04 | 2,49 | 3,00 | 2,25 |
| Азот аммонийный | 144,89 | 137,76 | 190,30 | 498,33 | 424,56 | 510,57 | 445,07 |
| Нитраты | 587,29 | 558,43 | 488,60 | 314,96 | 276,18 | 130,91 | 259,99 |
| Нитриты | 11,59 | 12,94 | 22,46 | 31,07 | 39,71 | 44,59 | 37,16 |
| Сухой остаток | 91261,07 | 91651,63 | 76727,08 | 68764,30 | 77217,65 | 74775,45 | 62563,88 |
| Хлориды | 11668,43 | 10447,53 | 12060,66 | 11002,29 | 12668,05 | - | 10294,94 |
| Фосфаты | 367,05 | 360,58 | 471,45 | 393,06 | 348,22 | 184,82 | 293,77 |

Таблица 2.5 – Количество загрязняющих веществ, поступивших в морскую среду со сточными водами СБО «Южная»

| Загрязняющее вещество | Фактический сброс, т/год | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 2000 г. | 2001 г. | 2002 г. | 2005 г. | 2006 г. | 2007 г. | 2008 г. |
| Взвешенное вещество | 496,06 | 492,76 | 447,24 | 529,99 | 712,86 | 694,95 | 837,78 |
| БПК ₅ | 418,20 | 537,36 | 576,44 | 454,54 | 470,36 | 330,10 | 452,98 |
| ХПК | 3297,79 | 2723,98 | 2335,57 | 2402,19 | 2462,87 | 3033,35 | 3127,05 |
| Перманганатная окисляемость | 492,72 | 534,71 | 412,45 | 397,39 | 392,36 | 450,78 | 477,34 |
| Нефтепродукты | 2,89 | 1,54 | 2,63 | 1,83 | 2,28 | 0,94 | 0,97 |
| СПАВ | 2,67 | 3,08 | 3,98 | 2,90 | 2,74 | 2,35 | - |
| Азот аммонийный | 412,08 | 165,67 | 267,85 | 208,07 | 198,54 | 211,30 | 345,83 |
| Нитраты | 215,22 | 300,01 | 234,55 | 210,75 | 225,01 | 303,34 | 301,99 |
| Нитриты | 7,51 | 10,04 | 10,68 | 10,76 | 10,16 | 17,37 | 14,27 |
| Сухой остаток | 29001,66 | 26671,63 | 21616,46 | 20016,75 | 22941,12 | 27422,26 | 23633,09 |
| Хлориды | 5349,87 | 4784,22 | 5068,69 | - | - | - | 4724,67 |
| Фосфаты | 118,45 | 230,98 | 208,71 | 225,04 | 298,29 | 364,38 | 428,63 |

2.2 Очистные сооружения Ильичевского морского торгового порта

Очистные сооружения Ильичевского морского торгового порта (ИМТП) расположены к югу от г.Ильичевск на расстоянии 2,5 км от городской черты и в 700 м от с. Санжейка.

Сооружения предназначены для очистки производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод предприятий и населения г. Ильичевск, с последующим сбросом обезвреженных стоков в акваторию Черного моря.

Отведение сточных вод производится через глубоководный рассеивающий выпуск на расстоянии 2,0 км от берега. Глубина моря в районе выпуска сточных вод составляет 17 м.

Рассчитанная согласно [35] кратность начального разбавления для очистных сооружений ИМТП составляет 8 раз, а длина участка начального разбавления равна 15 м.

Проектная производительность очистных сооружений составляет 9,09 млн. м³/год.

Очистка смешанного хозяйственно-бытового и производственного стока осуществляется механическими и биологическими методами.

Сточные воды по напорному трубопроводу поступают в приемную камеру, последовательно проходят песколовку, первичный радиальный отстойник. Затем осветленные стоки попадают в двухсекционный трехкоридорный аэротенк для биологической очистки с рециркуляцией активного ила. Из аэротенка биологически очищенные стоки поступают во вторичный радиальный отстойник и затем в контактный резервуар для обеззараживания, откуда отводятся в акваторию Черного моря.

Механические решетки предназначены для задержания отбросов. В приемной камере происходит аккумулялирование и частичное усреднение потока.

Песколовки служат для частичного усреднения расхода сточных вод, задержания плавающих отбросов, минеральных примесей крупностью 0,20 – 0,25 мм. Песколовки работают в поочередном режиме.

В первичных радиальных отстойниках осуществляется предварительное осветление сточных вод, выделение нерастворенных взвешенных крупнодисперсных частиц. Отстойники работают в

параллельном режиме, предусмотренное проектом время отстоя – 1,5 часа.

В аэротенке протекает процесс полной биологической очистки. Задействована одна секция для биологической очистки стока, вторая секция – для минерализации осадков из первичных отстойников. В аварийных ситуациях обе секции аэротенка запускаются на биологическую очистку.

Во вторичных радиальных отстойниках протекают процессы осветления сточной воды, отделение активного ила, взвешенных веществ. Время процесса отстоя – не менее двух часов.

В контактных резервуарах происходит 30-минутное обеззараживание стоков. Сточные воды подвергаются хлорированию только по эпидемиологическим показателям.

Динамика поступления сточных вод на очистные сооружения взята из «Проекта предельно допустимых сбросов загрязняющих веществ, отводимых с очищенными сточными водами в Черное море очистными сооружениями Ильичевского морского торгового порта» (2000, 2006 гг.) и представлена на рис. 2.3.

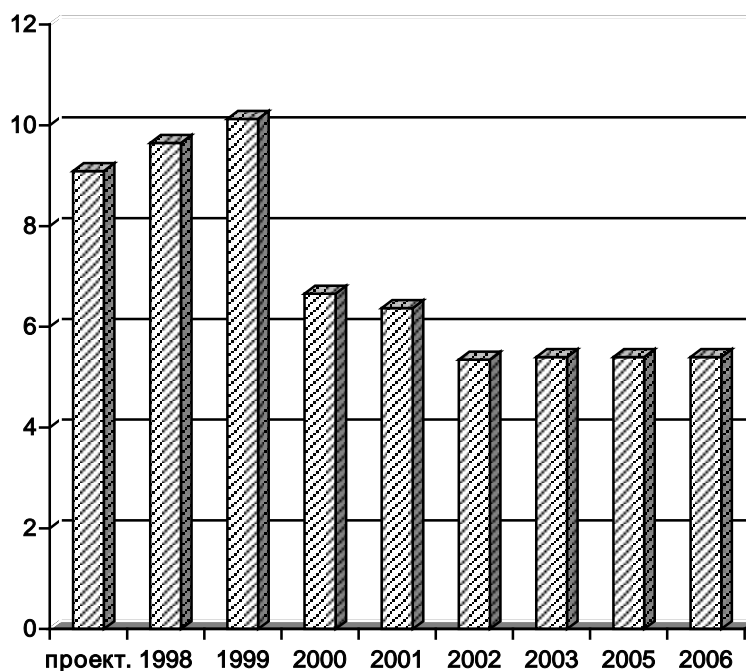


Рис. 2.3 – Проектный и реальные годовые объемы сточных вод, поступивших на очистные сооружения ИМТП, млн. м³/год.

Как видно из приведенной диаграммы, фактические расходы сточных вод, поступившие на очистные сооружения в 1998 – 1999 гг., превышали проектные, что связано с подключением второй линии

коллектора Производственного управления жилищно-коммунального хозяйства г. Ильичевска в 1996 г. Начиная с 2000 г., из-за общего спада производства, прекращения деятельности Ильичевской птицефабрики, внедрения мероприятий по рациональному использованию водных ресурсов на предприятиях, строгого контроля расходов свежей воды питьевого качества на предприятиях и в жилых домах г. Ильичевска (установка счетчиков на входе и на выходе), расходы сточных вод, поступающих на очистку, уменьшились в 1,5 раза по сравнению с 1999 г.

По своему составу сточные воды, поступающие на очистные сооружения в настоящее время, приближаются к хозяйственно-бытовому стоку.

Качество сбросных вод, отводимых в море после очистки, зависит от качественного состава поступающей на очистку сточной воды и методов очистки, используемых на очистных сооружениях. Характеристика сточных вод, отводимых в Черное море, представлена в табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Показатели качества сточных вод на выходе с очистных сооружений ИМТП

| Нормируемые показатели состава сточных вод | Средняя концентрация, мг/дм ³ | | | | | |
|--|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2000 г. | 2001 г. | 2002 г. | 2003 г. | 2005 г. | 2006 г. |
| Взвешенные вещества | 5,6 | 5,7 | 6,53 | 7,24 | 6,73 | 7,54 |
| БПК ₅ | 5,73 | 5,0 | 5,78 | 7,34 | 6,84 | 5,94 |
| Перманганатная окисляемость | 8,5 | 10,2 | 9,42 | - | - | - |
| ХПК | 21,2 | 16,7 | 26,0 | 56,0 | 18,9 | 19,6 |
| Нефтепродукты | 0,043 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| Азот аммонийный | 2,18 | 2,30 | 2,96 | 4,31 | 1,57 | 1,71 |
| Азот нитратный | 3,79 | 5,5 | 4,97 | 20,75 | 7,58 | 6,94 |
| Азот нитритный | 0,318 | 0,31 | 0,24 | 0,96 | 0,115 | 0,144 |
| Фосфаты | 1,90 | 1,85 | 2,79 | 2,61 | 4,7 | 5,14 |
| Железо общее | 0,056 | 0,05 | 0,05 | - | 0,07 | 0,063 |

Как видно из приведенной таблицы, в 2000 г. концентрации БПК_{полн} в 1,5 раз превышали ПДК для рыбохозяйственных водоемов, азота аммонийного – в 2 раза, а азота нитратного – в 3,5 раза. В

период с 2003 по 2005 гг. на очистных сооружениях ИМТП была проведена реконструкция первичных отстойников и аэротенков, что позволило снизить содержание азота аммонийного и нитритного в очищенных сточных водах в среднем в 1,3 и 2,1 раза, соответственно. В то же время, в сточных водах, прошедших очистку на очистных сооружениях, фиксируется увеличение концентраций азота нитратного и минерального фосфора в 2,0 и 2,8 раза, соответственно.

Количество загрязняющих веществ, поступающих в море со сточными водами ИМТП за период 2001 – 2006 гг., представлено в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Количество загрязняющих веществ, поступающих в морскую среду со сточными водами ИМТП

| Загрязняющее вещество | Фактический сброс, т/год | | | | |
|-----------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 2001 г. | 2002 г. | 2003 г. | 2005 г. | 2006 г. |
| Взвешенное вещество | 36,31 | 34,94 | 39,07 | 36,12 | 40,09 |
| БПК ₅ | 31,86 | 30,93 | 39,61 | 36,72 | 31,59 |
| ХПК | 106,40 | 139,13 | 302,23 | 101,44 | 104,23 |
| Перманганат. окисл. | 64,98 | 50,41 | - | - | - |
| Нефтепродукты | 0,25 | 0,16 | 0,22 | 0,27 | 0,27 |
| АПАВ | 0,19 | - | - | 0,24 | 0,27 |
| Азот аммонийный | 14,65 | 15,84 | 23,26 | 8,43 | 9,09 |
| Нитраты | 35,04 | 26,59 | 111,99 | 40,68 | 36,91 |
| Нитриты | 1,98 | 1,27 | 5,20 | 0,62 | 0,77 |
| Железо | 0,32 | 0,27 | - | 0,38 | 0,34 |
| Фосфаты | 11,79 | 14,93 | 14,09 | 25,23 | 27,33 |

2.3 Очистные сооружения Одесского припортового завода

Очистные сооружения Одесского припортового завода (ОПЗ) предназначены для обеззараживания хозяйственно-бытовых сточных вод завода, порта и г. Южный, пос. Гвардейский, промышленно-ливневых и химически загрязненных сточных вод ОПЗ, с использованием механических и биологических методов очистки.

Сточные воды аккумулируются в приемной камере, откуда проходят последовательно через решетки-дробилки, песколовки, первичные радиальные отстойники. Осветленная вода поступает на биологическую очистку в аэротенки-окислители, затем переходит во вторичные радиальные отстойники, собирается в приемном

резервуаре насосной станции, обеззараживается и отводится в Черное море через глубоководный рассеивающий выпуск на расстояние 2,3 км от уреза воды. Средняя глубина моря в месте выпуска – 16 м.

Рассчитанная согласно [35] кратность начального разбавления для очистных сооружений ОПЗ составляет 12 раз, а длина участка начального разбавления равна 16 м.

Проектный объем сбрасываемых очищенных сточных вод составляет 8,5 млн. м³/год.

Приемная камера служит для гашения скорости поступающих сточных вод и предусматривает возможность отведения некондиционных сточных вод в аэротенк-усреднитель с последующей их подачей в голову сооружений.

На решетках задерживаются крупные предметы (тряпки, бумага, камни и др.), дробилки предназначены для их измельчения.

В горизонтальных песколовках с круговым движением воды осуществляется выделение песка в осадок под действием силы тяжести.

В первичных отстойниках происходит удаление нерастворенных тонущих и всплывающих органических и неорганических загрязнителей, не задержанных решетками и песколовками. В отстойниках происходит осветление сточных вод с эффективностью до 50 %.

В аэротенках-окислителях протекают процессы аэробного биохимического окисления растворенных загрязнителей с помощью активного ила (биоценозов микроорганизмов). Аэротенк представляет собой сборный железобетонный резервуар, оборудованный нижними и верхними распределительными каналами подачи сточной воды. Для перемешивания и аэрации активного ила воздухом на дне аэротенка по всей его длине проложены фильтросные каналы, перекрытые фильтросными керамическими плитами для равномерной подачи воздуха. Секционная трехкоридорная конструкция аэротенка предусматривает возможность работы с регенерацией циркуляционного активного ила.

Во вторичных отстойниках протекают процессы осветления сточной воды, выделения активного ила.

Обеззараживание осуществляется раствором гипохлорита натрия в трубопроводах очищенных вод.

Динамика поступления сточных вод на очистные сооружения ОПЗ взята из «Проекта предельно допустимых сбросов загрязняющих веществ, отводимых с очищенными сточными водами в Черное море очистными сооружениями Одесского припортового завода» (1998, 2004 гг.) и представлена на рис. 2.4.

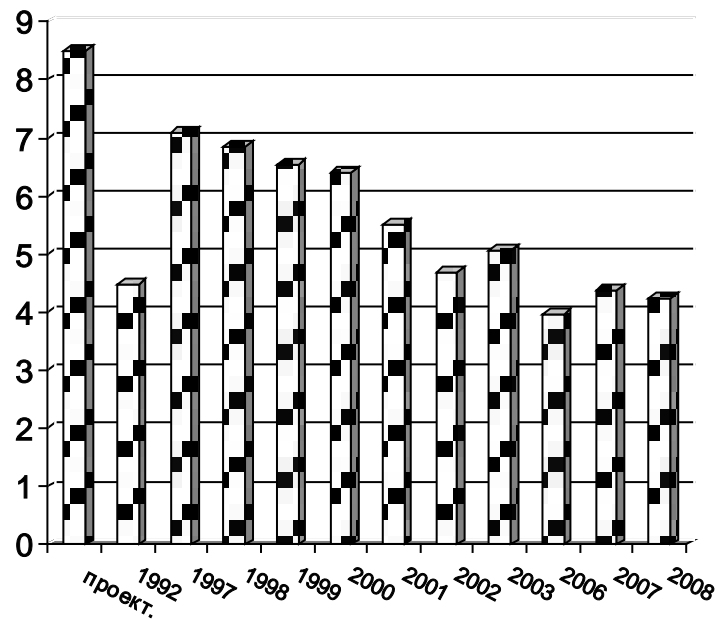


Рис. 2.4 – Проектный и реальные годовые объемы сточных вод, поступивших на очистные сооружения ОПЗ, тыс. м³/год.

Как видно из приведенной диаграммы, с конца 90-х годов фиксируется уменьшение объемов стоков, поступающих на очистку. Очистные сооружения за рассматриваемый период были загружены в среднем на 82 % от проектной производительности. Падение объемов объясняется уменьшением объемов стоков от самого производства и от сторонних потребителей, что связано с повышением тарифов на воду, ее экономией и рациональным использованием.

Качество сточных вод, поступающих на очистные сооружения и отводимых после очистки в море, определяется характером основного производства и методами очистки стоков на самих очистных сооружениях. Характеристика сточных вод отводимых в Черное море представлена в табл. 2.8.

Как видно из приведенной таблицы, концентрации всех загрязняющих веществ превышают предельно допустимые значения для рыбохозяйственных водоемов. Однако можно отметить, что начиная с 2001 г. наблюдается снижение концентраций азотсодержащих загрязняющих веществ. Содержание фосфатов в сбрасываемых сточных водах изменилось незначительно. Такая ситуация связана с усовершенствованием технологии очистки стоков в аэротенках.

Количество загрязняющих веществ, поступивших в море со сточными водами ОПЗ за период 2001 – 2003 гг. представлено в табл. 2.9.

Таблица 2.8 – Показатели качества сточных вод на выходе с очистных сооружений ОПЗ (данные ведомственной лаборатории)

| Контролируемый показатель | Концентрация, мг/л | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | год | | | | | | | | |
| | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2006 | 2007 | 2008 |
| Аммоний солевой | 0,97 | 4,35 | 1,75 | 0,87 | 0,64 | 0,36 | 0,465 | 0,454 | 0,53 |
| Карбамид | 4,62 | 0,65 | 4,25 | 0,40 | 0,24 | 0,25 | - | - | - |
| Нитраты | 88,7 | 95,9 | 78,8 | 66,0 | 70,29 | 74,87 | 27,0 | 21,7 | 13,9 |
| Нитриты | 0,09 | 0,29 | - | 0,04 | 0,023 | 0,031 | 0,12 | 0,087 | 0,10 |
| Фосфаты | 4,65 | 4,3 | 6,0 | 5,85 | 6,01 | 7,76 | 8,4 | 9,3 | 8,62 |
| ХПК | 20,8 | 21,5 | 19,0 | 15,5 | 21,5 | 24,77 | 28,4 | 20,9 | 32,0 |
| Взвешенные вещества | 11,0 | 9,0 | 13,5 | 9,5 | 9,89 | 10,61 | 11,62 | 8,90 | 11,5 |
| БПК _{полн} | - | 4,1 | 3,40 | 3,2 | 3,02 | 3,98 | 4,66 | 3,50 | 6,0 |
| Нефтепродукты | - | 0,09 | 0,09 | 0,11 | 0,05 | - | 0,016 | 0,082 | 0,082 |

Таблица 2.9 – Количество загрязняющих веществ поступивших в морскую среду со сточными водами ОПЗ

| Загрязняющее вещество | Фактический сброс, т/год | | | | | |
|-----------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2001 г. | 2002 г. | 2003 г. | 2006 г. | 2007 г. | 2008 г. |
| Взвешенное вещество | 52,42 | 46,39 | 53,74 | 46,04 | 38,89 | 48,73 |
| БПК ₅ | 11,04 | 8,86 | 12,61 | 13,88 | 11,50 | 19,12 |
| ХПК | 85,52 | 100,84 | 125,47 | 112,53 | 91,32 | 135,60 |
| Нефтепродукты | 0,61 | 0,23 | - | 0,063 | 0,36 | 0,35 |
| АПАВ | - | 0,14 | - | 0,12 | 0,13 | 0,12 |
| Азот аммонийный | 4,80 | 3,00 | 1,82 | 1,84 | 1,98 | 2,25 |
| Нитраты | 364,16 | 329,67 | 379,25 | 106,99 | 94,81 | 58,90 |
| Нитриты | 0,22 | 0,11 | 0,16 | 0,48 | 0,38 | 0,42 |
| Хлориды | - | 570,36 | 809,57 | - | - | 1114,49 |
| Фосфаты | 32,28 | 28,19 | 39,31 | 33,28 | 40,63 | 36,53 |

2.4 Ливневая канализация

Город Одесса делится на 3 бассейна канализования: Северный, Южный и жилой район Котовского. Каждый бассейн имеет обособленную схему канализации. Граница между Северным и Южными районами проходит по ул. Пироговской и ветке железной дороги Одесса-главная.

Общая площадь г. Одессы по Генеральному плану (1989 г.), разработанному Киевским институтом «Гипроград», составляет 17306,0 га, из них канализовано 9845 га. Площадь Южного бассейна составляет 3047,2 га, Северного – 5424,2 га и жилого района Котовского – 1374,1 га [36].

Территория Южного района занята жилой многоэтажной застройкой, с наибольшей степенью благоустройства по сравнению с другими районами города. Часть Южного бассейна канализования проходит вдоль побережья занятого социальными объектами.

Канализование Южного района, в основном, выполнено по полной раздельной системе, предусматривающей отдельный отвод сточных вод определенной категории (бытовых, производственных и дождевых вод). Отведение дождевых вод с территории южного бассейна осуществляется закрытой сетью коллекторов со сбросом в

море тремя выпусками в районе пляжа Аркадия, 10-й и 16-й станций Б. Фонтана. Ливневыпуски удалены от линии уреза воды на 300 м. Очистные сооружения на ливневых коллекторах отсутствуют.

В настоящее время постоянно действующими ливневыми выпусками являются выпуски на 10-й и 16-й станциях Б. Фонтана. Выпуск ливневой канализации в Аркадии опломбирован и открывается только в период интенсивного дождя (по информации Госинспекции по охране северо-западной части Черного моря) для предотвращения затопления прилегающей территории.

Расчетная пропускная способность ливневыпусков в Аркадии, на 10-й и 16-й станциях Б. Фонтана составляет 4,6 м³/с.

Помимо сброса поверхностных вод, через выпуски ливневой канализации 10-й и 16-й станций Б. Фонтана в настоящее время осуществляется постоянный несанкционированный сброс неочищенных бытовых сточных вод с прилегающей территории.

По оценке [33] общий объем сброса ливневых вод через ливневыпуски 10-й и 16-й ст. Б. Фонтана составляет 500 тыс. м³/год.

Годовой сток ливневых вод, поступающих с территории Южного бассейна канализования г. Одессы, можно рассчитать по формуле [37],:

$$W = 10 \cdot \varphi \cdot F \cdot H, \quad (2.1)$$

где 10 – переводной коэффициент;

φ – коэффициент стока дождевых или снеговых вод, который в расчетах принят равным 0,35;

F – водосборная площадь территории, га;

H – годовое количество осадков, мм.

Полученная с помощью формулы (2.1) оценка среднего годового стока ливневых вод Южного бассейна канализования составила 4,86 млн. м³/год [34].

Северный бассейн канализования делится на два основных бассейна – Фрунзенский и Приморский. Водораздельная линия между ними проходит по улице Преображенская.

Северная часть (бассейн ул. Промышленной, Липинской и Джутовой балки) представляет, в основном, промышленную часть города. Центральная часть Северного бассейна канализования представляет собой благоустроенные кварталы.

Система канализования этой части города исторически сложилась как общесплавная, имеющая одну водоотводящую сеть, предназначенную для совместного отведения сточных вод всех типов (бытовых, производственных, дождевых). На главном коллекторе

имеются ливневыпуски (Девалановский, Платоновский, Андросовский, 1-й и 2-й Заливные переулки), через которые часть смеси сточных вод сбрасывается без очистки в море. В настоящее время эти выпуски опломбированы (по информации Государственной экологической инспекции по охране северо-западной части Черного моря) и только в период интенсивного дождя ливневые воды сбрасываются в море через ливнесбросы для предотвращения аварийной ситуации в городе.

Проектная пропускная способность Девалановского ливневыпуска составляет $4,5 \text{ м}^3/\text{с}$, Платоновского – $4,6 \text{ м}^3/\text{с}$, Военного и Андросовского – $4,05 \text{ м}^3/\text{с}$, ливневыпусков 1-го и 2-го Заливных переулков – $11 \text{ м}^3/\text{с}$.

В период интенсивного дождя на главную насосную станцию «Северная» поступают смешанные хозяйственно-бытовые и дождевые стоки в количествах, превышающих проектную мощность СБО «Северная» [38], что приводит к затоплению близлежащей территории. Для предотвращения аварийной ситуации большая часть ливневого стока, в период выпадения интенсивных осадков, сбрасывается непосредственно в море без очистки.

Рассчитанный по формуле (2.1) средний годовой сток ливневых вод с Северного бассейна канализования составил $8,66 \text{ млн. м}^3/\text{год}$, из них непосредственно в море через систему ливневой канализации сбрасывается около $2,86 \text{ млн. м}^3/\text{год}$ неочищенных стоков [34].

В северо-восточной части города расположен жилой район Котовского и северная часть Пересыпи, вытянутая вдоль Николаевской и Балтской дорог. Жилой район Котовского широким массивом располагается вдоль Днепропетровской дороги и ул. Добровольского. Рельеф территории жилого района спокойный, с небольшим уклоном в сторону Куяльницкого лимана.

Канализация жилого района Котовского предусматривалась по полной раздельной схеме. В настоящее время построен участок магистрального дождевого коллектора по ул. Днепропетровской, но из-за недостаточности финансирования строительство коллектора прекращено, а проложенный участок ливневой канализации затампонирован. В настоящее время ливневые стоки отводятся по рельефу.

На количественный и качественный состав ливневого стока оказывают влияние как природные факторы (частота, продолжительность, интенсивность дождя, количество выпадающих осадков, продолжительность периода отсутствия осадков, испарение, фильтрация, задержание влаги растениями), так и антропогенные факторы (наличие производственных объектов на водосборной

территории, количество дорожных покрытий и интенсивность движения на них и др.). Поэтому количественный и качественный состав ливневых вод может быть различным даже в пределах одного населенного пункта.

Химический состав ливневых вод для г. Одессы представлен в табл. 2.10 по данным [33, 36, 39].

Таблица 2.10 – Гидрохимические характеристики ливневых вод

| Наименование вещества | Единицы измерения | Концентрация | |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------|----------------------|
| | | для г. Одессы | в среднем по Украине |
| БПК ₅ | мгО ₂ /дм ³ | 61,8 | 50 – 100 |
| Азот аммонийный | мг/дм ³ | 0,36 | 2,6 – 6,0 |
| Азот нитритный | мг/дм ³ | 0,35 | - |
| Азот нитратный | мг/дм ³ | 1,47 | - |
| Азот органический | мг/дм ³ | 8,12 | - |
| Фосфаты | мг/дм ³ | 0,25 | 0,5 – 1,0 |
| Фосфор органический | мг/дм ³ | 0,13 | - |
| Взвешенное вещество | мг/дм ³ | 1501,53 | 1000 – 2000 |
| СПАВ | мг/дм ³ | 0,52 | - |
| Нефтепродукты | мг/дм ³ | 23,93 | 10 – 15 |
| Свинец | мг/дм ³ | 0,50 | - |
| Цинк | мг/дм ³ | 1,13 | - |
| Никель | мг/дм ³ | 0,069 | - |
| Медь | мг/дм ³ | 0,24 | - |
| Кадмий | мг/дм ³ | 0,004 | - |
| Ртуть | мг/дм ³ | 0,0002 | - |
| Общее число микроорганизмов | кл/мл | 8300000 | - |
| Величина коли-индекса | кл/л | 1285000 | - |
| Численность стрептококков | кл/л | 1221500 | - |

Как видно из табл. 2.10, по своим гидрохимическим и микробиологическим показателям ливневые стоки г. Одессы идентичны недостаточно очищенным и неочищенным сточным водам промышленных предприятий и городских канализационных коллекторов. Так, содержание в ливневом стоке азота нитритного в 18 раз выше предельно допустимого уровня для рыбохозяйственных водоемов (ПДК – 0,02 мг/дм³). В неочищенном поверхностном стоке концентрация нефтепродуктов выше средних значений по Украине и

более чем в 400 раз превышает ПДК. Концентрация СПАВ – в 5 раз выше ПДК. Также в поверхностном стоке, поступающем в море, фиксируются значительные концентрации металлов. Так, концентрация меди в 48 раз выше предельно допустимой (ПДК – 0,005 мг/дм³), ртути – в 2 раза (ПДК – 0,0001 мг/дм³), свинца – в 50 раз (ПДК – 0,01 мг/дм³) и цинка – в 23 раза (ПДК – 0,05 мг/дм³).

Количественный состав загрязняющих веществ в сточных водах, поступающих в Одесский район СЗЧМ от основных городских ливневыпусков, представлен в табл. 2.11.

Таблица 2.11 - Количество загрязняющих веществ, поступающих в морскую среду с ливневыми водами

| Загрязняющее вещество | Количество, т/год |
|-----------------------|-------------------|
| Взвешенное вещество | 11591,81 |
| БПК ₅ | 477,1 |
| Нефтепродукты | 184,74 |
| СПАВ | 4,01 |
| Азот аммонийный | 2,78 |
| Нитраты | 11,35 |
| Нитриты | 2,7 |
| Фосфаты | 1,93 |
| Свинец | 3,86 |
| Цинк | 8,72 |
| Никель | 0,53 |
| Медь | 1,85 |
| Кадмий | 0,03 |
| Ртуть | 0,002 |

2.5 Дренажный сток

Морское побережье г. Одессы на протяжении около 22 км подвержено оползневым процессам. Для предотвращения разрушения береговой полосы в 1961 г. был разработан проект первой очереди мероприятий по борьбе с оползнями, включающих в себя:

- защиту существующих и создание новых искусственных пляжей с системой бун, волноломов и траверсов для удержания наносов и отсыпки пляжных материалов;

- перехват и отвод подземных вод дренажными галереями на контакте между понтическими известняками и меотическими глинами;
- устройство скважин вертикального дренажа, сбрасывающих воду в нижележащие галереи;
- организованный отвод поверхностных вод системой нагорных каналов, лотков, перепадов и быстотоков;
- разгрузку верхней части склонов путем срезки слоя грунта мощностью до 15 м с устройством минимального откоса 1:2,5 и проведением дренирования и травосеяния.

В результате принятых мер на побережье г. Одессы создана из привозного материала полоса искусственных пляжей от Ланжерона до 16 ст. Б. Фонтана и далее, протяженностью около 15 км при ширине 40 – 50 м.

Для удержания пляжа и предохранения от размыва контрбанкета в море на расстоянии 100 – 120 м от уреза воды были построены подводные волноломы, гребень которых заглублен ниже среднего уровня моря на 0,6 м. Основное назначение волнолома – гашение энергии волны (от 10 до 35 % в зависимости от ее высоты) и удерживание песка искусственного пляжа от выноса на большие глубины. Для обеспечения стабильного положения пляжа, акватории между волноломом и берегом через 200 – 300 м перегорожены перпендикулярными к берегу надводными сооружениями – траверсами. Эти сооружения не дают возможности песку перемещаться вдоль берега под действием косо подходящей волны. Прибрежная отмель между урезом моря и волноломом покрыта слоем песка мощностью 0,5 – 1,5 м. Общая площадь созданных на участке искусственных пляжей составила 20 га. Первая очередь берегозащитных сооружений, протяженностью 6,2 км, охватила береговую зону от Ланжерона до Аркадии, вторая (6,5 км) была продолжена до мыса Большой Фонтан.

Существующий комплекс гидротехнических конструкций превратил прибрежную зону моря в цепочку искусственных бассейнов разной степени изолированности, огороженных траверсами и волноломами со средним объемом 52 тыс.м³. Водообмен с водами открытого моря осуществляется в поверхностном 50 – 75 см слое вдоль волнолома и у оконечности траверсов (приблизительная протяженность 15 м) в месте их соединения с волноломом. В то же время эти изолированные участки моря являются водоприемниками подземных дренажных и ливневых вод, что приводит к изменению и ухудшению качественного состава морских вод прибрежной зоны г. Одессы.

Для дренирования вод понтического водоносного горизонта на участке, параллельно бровке обрыва, пройдена подземная галерея. 195 дренажных скважин оборудованы фильтрами на всю мощность водоносного горизонта и вода из них сбрасывается в галерею, либо в толщу понтических известняков. Из галереи дренажные воды поступают в водосборные штольни, выходящие в прибрежную зону примерно через 1 км в местах понижения кровли водоупора. Всего в районе 1 и 2 очереди берегозащитных сооружений находятся 11 дренажных штолен от Одесского порта до мыса Большой Фонтан, общей протяженностью 12,7 км.

Гидротехнические сооружения первой очереди противооползневых сооружений включают 7 штолен, из которых дренажные воды сбрасываются в море в бассейны противооползневых сооружений. Порталы штолен №№ 1, 2, 4, 5 и места сброса из них дренажных вод в море расположены на закрытых территориях. Портал штольни СРЗ-2 и лоток, по которому дренажная вода из штольни поступает в канализационный люк с дальнейшим сбросом в море, находится в полуразрушенном состоянии.

Вторая очередь противооползневых сооружений от Аркадии до мыса Б. Фонтан включает в себя пять дренажных штолен. Из них на закрытых территориях находятся порталы штолен №№ 7, 10 и место сброса в море дренажных вод из штольни № 6. Для штолен №№ 7, 8, 9, 10 предусмотрен сброс дренажных вод по лоткам на траверсах за линию волноломов. В настоящее время сброс за линию волноломов производится только из штолен №№ 9, 10, что составляет около 17 % от суммарного сброса дренажных вод 1-й и 2-й очереди противооползневых сооружений. Лотки, предназначенные для сбора дренажных вод из штолен №№ 7, 8 деформированы и вода из них стекает в бассейны до линии волноломов.

Дебит штольневого стока испытывает закономерные колебания на протяжении года. Различия между максимальным и минимальным объемами часового стока составляет 8 – 12 % от среднегодового значения. Максимальный расход воды через штольни отмечается в мае – июне и августе, совпадая с периодом максимальных осадков, минимальный – с декабря по февраль включительно. Дебит штолен 1 и 2 очереди составляет 18 млн. м³/год [32].

Качественный состав дренажных вод, взятый из [41], представлен в табл. 2.12.

Как видно из табл. 2.12, дренажные воды, поступающие в прибрежную полосу моря, содержат значительное количество азота нитратного. Это может быть связано с тем, что нитраты являются конечным продуктом биохимической трансформации азота. Их

содержание в дренажных водах всех выпусков в среднем в 2,6 раза выше предельно допустимого уровня (ПДК – 9,1 мг/дм³). Содержание нефтепродуктов в дренажных водах выпуска Яхт-клуба в 31 раз превышает предельно допустимые значения (ПДК – 0,05 мг/дм³), пляжа санатория им. Чкалова – в 5 раз и в дренажных водах выпуска на 11 ст. Большого Фонтана – в 3,8 раза выше ПДК.

Количественный состав содержания загрязняющих веществ в стоке дренажных вод представлен в табл. 2.13.

2.6 Сток от промышленных источников загрязнения

К промышленным источникам загрязнения относятся предприятия, осуществляющие непосредственный сброс сточных вод в акваторию Одесского залива (рис. 2.1). В настоящее время к их числу относятся:

- в г. Ильичевск – портовый холодильник Ильичевского морского рыбного порта (ИМРП), который имеет общую систему охлаждения компрессоров. Для охлаждения конденсаторов используется система снабжения технической водой из акватории Сухого лимана. После использования техническая вода сбрасывается через ливневую канализацию порта в Сухой лиман.
- в г. Одессе – портовый холодильник, Одесский судоремонтный завод (СРЗ «Украина»), станция кондиционирования воздуха морвокзала Одесского порта, ЗАО «Одесская сахарная компания», станция очистки балластных и льяльных вод (СОБВ) Одесского морского торгового порта, Одесская теплоэлектроцентраль (ОТЭЦ). На этих предприятиях существует полная раздельная система канализования. Хозяйственно-бытовые и производственные стоки отводятся на городские очистные сооружения, а техническая (морская вода), используемая, в основном, для охлаждения различного оборудования, отводится после очистки в акваторию Одесского порта.

На всех предприятиях выпуски технической воды расположены в непосредственной близости от берега. Средняя глубина моря в районе выпусков технической воды для предприятия ИМРП составляет 2,5 м, портовый холодильник и ЗАО «Одесская сахарная компания» - 3,0 м, СРЗ «Украина» – 8 м, станция кондиционирования воздуха морвокзала Одесского порта – 9,5 м, ОТЭЦ – 1,5 м. Выпуск сточных вод с СОБВ – береговой. Качественная характеристика сточных вод,

отводимых в акваторию Черного моря промышленными источниками загрязнения взята из «Проектов предельно допустимых сбросов загрязняющих веществ» для каждого отдельного предприятия и представлена в табл.2.14.

Как видно из табл. 2.14, показатель БПК_{полн} для ОТЭЦ в 1,8 раза превышает предельно допустимое значение для воды рыбохозяйственных водоемов (ПДК – 3,0 мг/дм³). Содержание азота нитритного и нитратного в сточной воде ЗАО «Одесская сахарная компания» в 4 раза выше ПДК (0,02 мг/дм³ и 9,1 мг/дм³, соответственно). Количество нефтепродуктов в отводимой технической воде с предприятия СОБВ в 2 раза выше ПДК и ОТЭЦ – в 3 раза выше ПДК (0,05 мг/дм³).

Количественный состав содержания загрязняющих веществ в сточных водах, поступающих в море от промышленных источников загрязнения, представлен в табл. 2.15.

2.7 Относительный вклад береговых антропогенных источников в загрязнение морской среды Одесского района

Оценка относительного вклада каждой группы антропогенных источников в загрязнение морской среды Одесского района, по каждому из рассматриваемых веществ, выполнена по осредненным значениям за 2000 – 2002 гг., т.к. по количественному составу за рассмотренный период времени стоки практически не изменились. Полученные результаты представлены в табл. 2.16.

Анализ приведенной информации о количестве загрязняющих веществ, поступающих со сточными водами антропогенных источников загрязнения, показал, что наиболее мощными из идентифицированных источников загрязнения морской среды являются СБО «Южная» и «Северная». В сумме они поставляют в морскую среду 39 % нитратов, 82 % нитритов, 93 % аммонийного азота, 94 % фосфатов, 59 % органических веществ и 64 % синтетических поверхностно активных веществ (СПАВ) от общего их количества, поступающего от антропогенных источников.

Однако нельзя пренебрегать вкладом остальных рассматриваемых источников загрязнения. Так, например, с ливневыми стоками в морскую среду поступает около 91 % взвешенного вещества, 31 % органических веществ, 93 %

нефтепродуктов и 33 % СПАВ. Однако следует отметить то, что влияние ливневого стока эпизодическое и зависит от продолжительности и интенсивности выпадения атмосферных осадков.

Сток дренажных вод является существенным источником азота нитратов (около 22 %).

Сточные воды Одесского припортового завода поставляют в морскую среду около 20 % от общего количества нитратов и почти 4 % фосфатов. Со сточными водами промышленных предприятий в морскую среду поступает более 17 % азота нитратов.

Как видно из табл. 2.16, значительное количество загрязняющих веществ в морскую среду поступает от городских очистных сооружений. Но следует отметить то, что эти источники (кроме СБО «Северная») имеют глубоководные выпуски, удаленные от берега на расстояние более 2 км, поэтому их влияние на качество морских вод прибрежной зоны ослабляется значительным начальным и последующим гидродинамическим разбавлением.

Напротив, ливневые и дренажные стоки, а также стоки от промышленных источников, в большинстве своем, имеют береговые или удаленные на незначительное расстояние от берега выпуски. Кроме того, во время интенсивного дождя или таяния снега осуществляется аварийный сброс смеси ливневых и хозяйственно-бытовых стоков из ливневыпусков центральной части города, что приводит к значительному загрязнению акватории Одесского залива.

Таблица 2.12 – Качественная характеристика стока дренажных вод

| Место отбора проб | Расход воды, млн. м ³ /год | NH ₄ ⁺ , мг/дм ³ | NO ₂ ⁻ , мг/дм ³ | NO ₃ ⁻ , мг/дм ³ | PO ₄ ⁻ , мг/дм ³ | БПК _{пол} , мг/дм ³ | Нефтепродукты, мг/дм ³ |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|
| Пляж Ланжерон | 4,03 | 0,315 | 0,0020 | 22,6 | 0,023 | 0,60 | 0,06 |
| Пляж «Отрада» | 0,45 | 0,216 | 0,0012 | 21,2 | 0,023 | - | 0,06 |
| Яхт-клуб | 0,09 | 0,065 | 0,0013 | 23,5 | 0,027 | 0,18 | 1,57 |
| Пляж «Дельфин» | 2,46 | 0,455 | 0,0010 | 24,5 | 0,023 | 0,95 | 0,05 |
| Пляж санатория им. Чкалова | 1,88 | 0,364 | 0,0009 | 23,5 | 0,023 | 0,70 | 0,25 |
| Малый Фонтан | 1,21 | 0,170 | 0,0007 | 27,0 | 0,074 | 0,65 | 0,06 |
| 8 ст.Б.Фонтана | 1,29 | 0,050 | 0,0009 | 19,0 | 0,034 | 0,40 | 0,03 |
| 11ст.Б.Фонтана | 3,66 | 0,270 | 0,0010 | 23,0 | 0,019 | 1,05 | 0,19 |
| 13ст.Б.Фонтана | 0,17 | 0,054 | 0,0010 | 26,0 | 0,030 | 1,05 | 0,02 |
| 15ст.Б.Фонтана | 0,13 | 0,080 | 0,0013 | 19,0 | 0,090 | 1,35 | 0,05 |
| Причал р/к им. Шмидта | 2,63 | 0,036 | 0,0022 | 26,8 | 0,082 | 2,05 | 0,05 |

Таблица 2.13 – Количество загрязняющих веществ, поступающих в морскую среду с дренажными водами

| Место отбора проб | Азот аммонийный, т/год | Нитриты, т/год | Нитраты, т/год | Фосфаты, т/год | БПК ₅ , т/год | Нефтепродукты, т/год |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Пляж «Ланжерон» | 1,27 | 0,0081 | 91,08 | 0,093 | 1,51 | 0,24 |
| Пляж «Отрада» | 0,10 | 0,0005 | 9,54 | 0,010 | - | 0,03 |
| Яхт-клуб | 0,01 | 0,0001 | 2,12 | 0,002 | 0,02 | 0,14 |
| Пляж «Дельфин» | 1,12 | 0,0025 | 60,27 | 0,057 | 1,46 | 0,12 |
| Пляж санатория им. Чкалова | 0,68 | 0,0017 | 44,18 | 0,043 | 0,83 | 0,47 |
| Малый Фонтан | 0,21 | 0,0008 | 32,67 | 0,090 | 0,49 | 0,07 |
| 8 ст. Б. Фонтана | 0,06 | 0,0012 | 24,51 | 0,044 | 0,33 | 0,04 |
| 11 ст. Б. Фонтана | 0,99 | 0,0037 | 84,18 | 0,070 | 2,40 | 0,70 |
| 13 ст. Б. Фонтана | 0,01 | 0,0002 | 4,42 | 0,005 | 0,11 | 0,003 |
| 15 ст. Б. Фонтана | 0,01 | 0,0002 | 2,47 | 0,012 | 0,11 | 0,007 |
| Причал р/к им. Шмидта | 0,09 | 0,0058 | 70,48 | 0,216 | 3,37 | 0,13 |
| Всего | 4,55 | 0,0248 | 452,92 | 0,642 | 10,62 | 1,95 |

Таблица 2.14 – Качественная характеристика загрязнения сточных вод, отводимых в акваторию Черного моря промышленными источниками загрязнения

| Источник загрязнения | Проектный расход, млн. м ³ /год | Нормируемые показатели | | | | | | | |
|------------------------------------|--|---------------------------------------|--|---|---|---|----------------------------------|--------------------------|------------------------|
| | | Взвешен. вещество, мг/дм ³ | БПК _{полн} , мг/дм ³ | NO ₃ ⁻ , мг/дм ³ | NO ₂ ⁻ , мг/дм ³ | NH ₄ ⁺ , мг/дм ³ | Железо общее, мг/дм ³ | СПАВ, мг/дм ³ | НП, мг/дм ³ |
| ИМРП | 2,63 | 3,00 | 2,86 | - | - | 0,39 | 0,05 | - | 0,05 |
| Порт. холодильник | 1,69 | 2,50 | 2,86 | - | - | 0,50 | 0,05 | - | 0,05 |
| СРЗ «Украина» | 0,43 | 3,25 | 3,00 | - | - | - | 0,05 | - | 0,05 |
| Морвокзал Одесского морского порта | 0,24 | 2,10 | 2,86 | - | - | - | 0,05 | - | 0,05 |
| СОБВ | 0,10 | 3,70 | - | - | - | - | 0,05 | 0,10 | 0,10 |
| ЗАО «Одесская сахарная компания» | 8,73 | 4,25 | 3,19 | 40,00 | 0,08 | 0,15 | 0,05 | - | 0,06 |
| ОТЭС | 22,39 | 7,40 | 5,43 | - | - | - | 0,16 | - | 0,15 |

Таблица 2.15 – Количество загрязняющих веществ, поступающих в морскую среду от промышленных источников загрязнения

| Источник загрязнения | Нормируемые показатели | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------|----------------|------------------------|---------------|-------------|-----------|
| | Взвешен. вещество, т/год | БПК ₅ т/год | Нитраты, т/год | Нитриты, т/год | Азот аммонийный, т/год | Железо, т/год | СПАВ, т/год | НП, т/год |
| ИМРП | 7,89 | 4,80 | - | - | 1,02 | 0,13 | - | 0,13 |
| Порт. холодильник | 4,22 | 3,08 | - | - | 0,84 | 0,08 | - | 0,08 |
| СРЗ «Украина» | 1,40 | 0,81 | - | - | - | 0,02 | - | 0,021 |
| Морвокзал Одесского морского порта | 0,50 | 0,44 | - | - | - | 0,01 | - | 0,012 |
| Синтез-Ойл | 0,37 | - | - | - | - | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| ЗАО «Одесская сахарная компания» | 37,10 | 17,44 | 349,30 | 0,69 | 1,31 | 0,44 | | 0,52 |
| ОТЭС | 165,69 | 77,64 | - | - | - | 3,58 | | 3,36 |
| Всего | 217,17 | 104,21 | 349,30 | 0,69 | 3,17 | 4,27 | 0,01 | 4,14 |

Таблица 2.16 – Характеристика относительного вклада береговых антропогенных источников в загрязнение вод акватории Одесского региона северо-западной части Черного моря (средняя за 2000 – 2002 гг.) [34]

| Наименование загряз. в-ва | | СБО «Северная» | СБО «Южная» | ИМТП | ОПЗ | Ливне- вый сток | Дренаж- ный сток | Индустриал. источники | Всего |
|------------------------------|-------|-------------------|----------------|-------|--------|--------------------|---------------------|--------------------------|----------|
| Взвешен. вещество | т/год | 700,34 | 601,66 | 37,31 | 47,70 | 11591,81 | - | 217,17 | 13195,99 |
| | % | 5,31 | 4,56 | 0,28 | 0,36 | 87,84 | - | 1,65 | 100 |
| БПК ₅ | т/год | 593,22 | 462,85 | 34,14 | 12,84 | 477,10 | 10,62 | 104,21 | 1694,98 |
| | % | 34,99 | 27,31 | 2,01 | 0,76 | 28,15 | 0,63 | 6,15 | 100 |
| НП | т/год | 3,96 | 1,87 | 0,23 | 0,32 | 184,74 | 1,95 | 4,14 | 197,21 |
| | % | 2,01 | 0,95 | 0,12 | 0,16 | 93,68 | 0,99 | 2,09 | 100 |
| СПАВ | т/год | 3,35 | 2,95 | 0,23 | 0,13 | 4,01 | 0,05 | 0,01 | 10,73 |
| | % | 31,22 | 27,49 | 2,14 | 1,21 | 37,37 | 0,48 | 0,09 | 100 |
| NH ₄ | т/год | 335,93 | 258,48 | 14,25 | 2,62 | 2,78 | 4,55 | 3,17 | 621,78 |
| | % | 54,03 | 41,57 | 2,29 | 0,42 | 0,45 | 0,73 | 0,51 | 100 |
| NO ₃ | т/год | 373,77 | 255,84 | 50,24 | 222,30 | 11,35 | 452,92 | 349,30 | 1715,72 |
| | % | 21,78 | 14,91 | 2,93 | 12,96 | 0,66 | 26,40 | 20,36 | 100 |
| NO ₂ | т/год | 28,50 | 11,54 | 1,97 | 0,30 | 2,7 | 0,0248 | 0,69 | 45,73 |
| | % | 62,32 | 25,24 | 4,31 | 0,66 | 5,90 | 0,06 | 1,51 | 100 |
| PO ₄ | т/год | 345,56 | 267,83 | 18,67 | 35,04 | 1,93 | 0,64 | - | 669,67 |
| | % | 51,60 | 39,99 | 2,79 | 5,23 | 0,29 | 0,10 | - | 100 |

2.8 Трансформированный речной сток как источник антропогенного загрязнения исследуемой акватории

2.8.1 Днепровско-Бугский лиман

Днепровско-Бугский лиман составляет основную часть более обширного физико-географического региона: устьевой области Днепра и Южного Буга.

Значительное влияние на сток низовья р. Днепр оказывает хозяйственная деятельность, а также дополнительное испарение с поверхности водохранилищ. В 80-х годах, когда безвозвратное водопотребление из реки было наибольшим, сток Днепра около Киева был большим, нежели в створе Каховской гидроэлектростанции. В эти годы он составлял соответственно 1460 и 1360 м³/с. В 90-е годы, когда безвозвратный забор воды значительно уменьшился, фактический сток реки стал приближаться к природному и в настоящее время в устье является большим, чем около Киева [42]. Осредненная величина годового стока Днепра составляет 43,1 км³ [14].

Внутригодовое распределение стока Южного Буга определяется наличием половодья, зимней и летней меженью. Наиболее полноводными месяцами являются март и апрель, наименьшими – сентябрь и октябрь. В засушливые годы бывают случаи, когда в верховье река превращается в отдельные водоемы. Особенностью Южного Буга является значительный твердый сток. Этому способствуют расчлененность рельефа и значительные площади распаханых сельскохозяйственных земель, а также наличие большого количества ставков и водохранилищ [42]. Средний сток Южного Буга составляет 3,4 км³/год [14].

Трансформирующаяся вода Днепра и Южного Буга после выхода из лимана растекается тонким слоем по поверхности моря. Языки распресненной воды преимущественно направлены от пролива к северной оконечности Тендровской косы или вдоль северного берега к Одессе. Такие выносы сравнительно больших объемов речной воды происходят эпизодически круглый год [43].

Основными источниками поступления биогенных веществ в Днепровско-Бугский лиман являются речной сток Днепра и Южного Буга, промышленно-коммунальные и сельскохозяйственные стоки, донные отложения и биотические составляющие экосистемы Днепровско-Бугской устьевой области. Характеристика содержания основных минеральных форм биогенных веществ в различных частях

Днепровско-Бугского лимана по данным [43] представлена в табл. 2.17.

Таблица 2.17 – Характеристика содержания минеральных форм биогенных веществ в водах Днепровско-Бугского лимана

| Район лимана | Показатель | | |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| | NH_4^+ , мг/дм ³ | NO_3^- , мг/дм ³ | PO_4^{3-} , мг/дм ³ |
| Восточный | 0,80 | 0,17 | 0,37 |
| Центральный | 1,27 | 0,38 | 0,40 |
| Западный | 0,85 | 0,27 | 0,34 |
| Бугский | 0,66 | 0,75 | 0,24 |

Как видно из табл. 2.17, повышенным содержанием биогенных веществ в воде выделяется центральный район лимана, т.к. он находится на стыке водных масс, поступающих из двух рек.

Аммонийный азот является начальным продуктом минерализации органического вещества. С этим может быть связано его повышенное содержание в водах лимана (в 3 – 5 раз выше предельно допустимой концентрации).

В табл. 2.18 представлены средние за 1976 – 2004 гг. концентрации основных биогенных веществ в водах Днепра, Южного Буга и Днепровско-Бугского лимана по данным [44].

Таблица 2.18 – Концентрации основных биогенных веществ в реках Днепр, Южный Буг и на выходе из Днепровско-Бугского лимана, мг/дм³

| Загрязняющее вещество | Днепр | Южный Буг | Кинбурнский пролив |
|-----------------------|-------|-----------|--------------------|
| Азот нитритный | 15 | 24 | 4 |
| Азот нитратный | 150 | 300 | 45 |
| Азот аммонийный | 41 | 151 | 48 |
| Сумма азота | 1020 | 1225 | 106 |
| Фосфаты | 130 | 222 | 64 |
| Фосфор общий | 180 | 298 | 192 |
| Кремний | 2710 | 2261 | 1258 |

Как видно из представленной таблицы, наиболее загрязненными являются воды р. Южный Буг, где концентрация биогенных веществ в два раза выше, чем в р. Днепр.

2.8.2 Днестр и Днестровский лиман

Днестр является второй по размерам рекой Украины и главной водной артерией Республики Молдова. Общая длина реки составляет 1362 км. Средний сток реки равен $322 \text{ м}^3/\text{с}$, но во время паводков он может существенно увеличиваться [45].

Днестр протекает через густо населенную территорию, а на его берегах расположены такие промышленные гиганты как Дрогобычский и Надвернянский нефтеперерабатывающие заводы, Стребниковский калийный комбинат, а также промышленные центры Тирасполь, Бендеры и др. города Молдовы. Все эти и многие другие промышленные предприятия оказывают значительное влияние на качество вод реки Днестр.

Совокупная антропогенная нагрузка на бассейн реки сама по себе очень большая, но кроме этого, экологическая ситуация часто обостряется в результате различного рода техногенных аварий.

В своем нижнем течении река Днестр впадает в Днестровский лиман.

Площадь лимана составляет 360 км^2 , средняя глубина – 1,5 м, длина 40 км, объем – 540 млн. м^3 [46]. По своим размерам Днестровский лиман является наибольшим из пресноводных лиманов Украины.

Зона трансформации речных вод у выхода из Днестровского лимана невелика и непостоянна. Часто наблюдающиеся компенсационные течения приводят к полному ее исчезновению. При хорошем развитии зона трансформации вытягивается полосой в поверхностном слое от Бугаза вдоль берега на юго-запад. Ширина полосы обычно не более 2 – 3 миль, а ее длина достигает 10 – 12 миль [14].

Формирование химического состава воды Днестра определяется региональными факторами, внутриводоемными процессами, а также поступлением в реку и ее притоки сельскохозяйственных, бытовых и промышленных стоков.

Гидрохимические характеристики р. Днестр (г. Могилев-Подольский) и Днестровского лимана (г. Белгород-Днестровский) по данным [42, 46] приведены в табл. 2.19.

Как видно из табл. 2.19, вода в Днестровском лимане является более загрязненной нитратами, фосфором и нефтепродуктами, чем в верхнем течении Днестра. Это объясняется значительной антропогенной нагрузкой на реку в среднем ее течении (территория Республики Молдова), где расположены основные антропогенные

источники загрязнения. Следует так же отметить превышение предельно допустимой концентрации фенолов в 3 раза и нефтепродуктов в 1,4 раза в Днестровском лимане.

Таблица 2.19 – Гидрохимические характеристики вод (мг/дм³) р. Днестр и Днестровского лимана

| Показатель | р. Днестр | Днестровский лиман |
|-----------------------|-----------|--------------------|
| Растворенный кислород | 13,3 | 10,1 |
| БПК ₅ | 2,98 | 2,22 |
| Азот аммонийный | 0,29 | 0,20 |
| Нитраты | 0,18 | 1,30 |
| Фосфор | 0,14 | 0,16 |
| Фенолы | - | 0,003 |
| Нефтепродукты | 0,054 | 0,072 |
| СПАВ | 0,094 | - |
| Медь | 0,004 | - |
| Цинк | 0,113 | - |

Динамика содержания основных загрязняющих веществ в водах р. Днестр с 1997 по 2002 гг. по данным Госуправления экологии и природных ресурсов в Одесской области [47] представлена в табл. 2.20.

Как видно из данных приведенных в табл. 2.20, концентрации практически всех основных загрязняющих веществ для р. Днестр не превышают предельно допустимые значения. Однако, концентрации сульфатов в 1997, 1999 и 2001 гг. превышают ПДК (100 мг/л). В целом, в последние два года наблюдалась тенденция снижения концентрации загрязняющих веществ в реке, что может быть связано с общим спадом производства, как в Украине, так и в Молдове, а также с сокращением поступления бытовых сточных вод от городов, осуществляющих непосредственный сброс стоков в реку.

В табл. 2.21 представлены средние за 1976 – 2004 гг. концентрации основных биогенных веществ по данным [44] в водах р. Днестр и Цареградского гирла Днестровского лимана.

Как видно из представленной таблицы, в воде р. Днестр отмечено значительное содержание соединений азота и кремния. Концентрация азота нитритного превышает ПДК в 5 раз для р. Днестр и в 2,5 раза для Цареградского гирла.

Таблица 2.20 – Содержание основных загрязняющих веществ в воде р. Днестр, мг/дм³

| Показатель | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|-----------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| Растворенный кислород | 8,7 | 8,44 | 9,85 | 9,35 | 8,30 | 8,4 |
| Взвешенные вещества | 27,52 | 29,0 | 35,6 | 33,5 | 29,10 | 18,5 |
| Азот аммонийный | 0,306 | 0,257 | 0,3 | 0,35 | 0,34 | 0,27 |
| Нитраты | 7,44 | 7,62 | 8,5 | 9,38 | 6,96 | 6,72 |
| Нитриты | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,046 | 0,05 | 0,086 |
| Хлориды | 51,82 | 43,4 | 43,7 | 45,24 | 48,24 | 46,74 |
| Сульфаты | 100,43 | 91,17 | 113,68 | 97,54 | 101,78 | 66,5 |
| Нефтепродукты | 0,036 | 0,029 | 0,035 | 0,032 | 0,027 | 0,031 |
| БПК ₅ | 2,675 | 2,73 | 2,74 | 2,37 | 2,34 | 2,15 |

Таблица 2.21 – Концентрации основных биогенных веществ, мг/дм³

| Загрязняющее вещество | Днестр | Цареградское гирло |
|-----------------------|--------|--------------------|
| Азот нитритный | 0,107 | 0,049 |
| Азот нитратный | 1,450 | 0,788 |
| Азот аммонийный | 0,344 | 0,122 |
| Сумма азота | 1,527 | 0,919 |
| Фосфаты | 0,085 | 0,060 |
| Фосфор общий | 0,161 | 0,136 |
| Кремний | 3,625 | 1,526 |

2.9 Оценка относительного вклада совокупности антропогенных источников и речного стока в загрязнение исследуемой акватории

Характерной особенностью Одесского района СЗЧМ является его относительная удаленность от устьевых зон рек, в то время как береговые антропогенные источники производят сброс загрязненных вод непосредственно в прибрежную зону акватории.

В табл. 2.22 приведена оценка вкладов, по поставляемой массе загрязняющих веществ, речного стока и совокупности береговых

антропогенных источников загрязнения Одесского района СЗЧМ по данным [34, 44].

Из приведенной таблицы видно, что наибольший вклад в загрязнение СЗЧМ вносит сток рек Днепр и Днестр. Так, с водами Днестра в морскую среду поступает 53,9 % нитритов, 57,3 % нитратов и 50,8 % аммонийного азота от общего их количества, что свидетельствует о значительных объемах использования азотных удобрений в водосборном бассейне Днестра, который проходит через сельскохозяйственные районы Украины и Молдовы. С водами р. Днепр в морскую среду поступает 74,9 % фосфатов.

Вклад стоков городских конгломератов, расположенных на побережье Одесского района, в загрязнение морской среды значительно меньше, чем речного стока (до 10 % от общего поступления загрязняющих веществ). Однако их влияние на качество морской среды рассматриваемой части СЗЧМ нельзя не учитывать, т.к. сброс сточных вод происходит в прибрежной зоне и существенно ухудшает качество ее вод. Такая ситуация связана с различной степенью гидродинамического разбавления речных вод, достигающих границ исследуемого региона, и сточных вод береговых антропогенных источников загрязнения.

Таблица 2.22 – Относительный вклад, по массе поставляемых в СЗЧМ биогенных веществ, речного стока Днепра, Южного Буга, Днестра и совокупности береговых антропогенных источников Одесского района

| | Нитриты, т/год | Нитраты, т/год | Азот аммонийный, т/год | Фосфаты, т/год |
|-------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| Днепр | 709,56 | 7095,60 | 1939,46 | 6149,52 |
| | 39,7 % | 31,3 % | 31,9 % | 74,9 % |
| Южный Буг | 68,12 | 851,47 | 428,57 | 630,09 |
| | 3,8 % | 3,8 % | 7,1 % | 7,6 % |
| Днестр | 961,69 | 13032,25 | 3091,79 | 763,96 |
| | 53,9 % | 57,3 % | 50,8 % | 9,3 % |
| Одесский конгломерат | 45,73 | 1715,72 | 621,78 | 669,67 |
| | 2,6 % | 7,6 % | 10,2 % | 8,2 % |
| Всего | 1785,1 | 22695,04 | 6081,6 | 8213,24 |

ГЛАВА 3

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И КАЧЕСТВО ВОД ОДЕССКОГО РАЙОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

3.1 Гидрохимический режим

Гидрохимическая характеристика вод Одесского района СЗЧМ основывается на данных экологического мониторинга Одесского филиала Института биологии южных морей НАН Украины, проведенного в период с 1988 г. по 1999 г. [2, 3, 19, 13, 21]. За указанный период в исследуемом районе была проведена 31 комплексная съемка акватории, с общим числом станций – 557. Большинство съемок проводились в середине гидрологических сезонов (весна, лето, осень, зима). Так, в мае и августе выполнено по 9 съемок, в ноябре – 3. Остальные съемки проведены в следующие месяцы: в апреле – 3, в июле – 1, в сентябре – 2, в октябре – 2, в декабре – 1 и феврале – 1. Наблюдения проводились на 42 станциях. Схема размещения станций представлена на рис. 3.1.

Для выделения роли береговых антропогенных источников загрязнения все станции были условно поделены на прибрежные и открытого моря, которые будем называть мористыми.

В число прибрежных включались станции № 1, 2, 6 – 14, 17, 18, 21, 22, 24, 41, непосредственно прилегающие к береговой черте (см. рис. 3.1). Глубина моря в районе указанных станций составляет до 10 м. Прибрежные станции находятся под непосредственным влиянием береговых антропогенных источников загрязнения. Так, станции № 21 и 22 находятся в районе выпуска сточных вод СБО «Южная», станции № 7 – 14 расположены в Одесском заливе, где находится Одесский морской порт и куда осуществляется сброс сточных вод с СБО «Северная» и ряда промышленных предприятий. Качество морских вод в районе станций № 1 – 6 и 26, 28, 31 формируется под влиянием сброса сточных вод с очистных сооружений Одесского припортового завода, а станции № 24, 41 находятся в зоне влияния сточных вод, поступающих от Ильичевского морского торгового порта и г.Ильичевск.

При проведении наблюдений за состоянием морской среды исследуемого района для поверхностного и придонного слоев определялись следующие гидрологические и гидрохимические

характеристики: температура воды, соленость, рН, Eh, БПК₅, содержание кислорода, минеральная и общая формы азота и фосфора, органический углерод, содержание СПАВ, нефтепродуктов, металлов в растворенной и взвешенной формах. Все определения проводились по стандартным методикам.

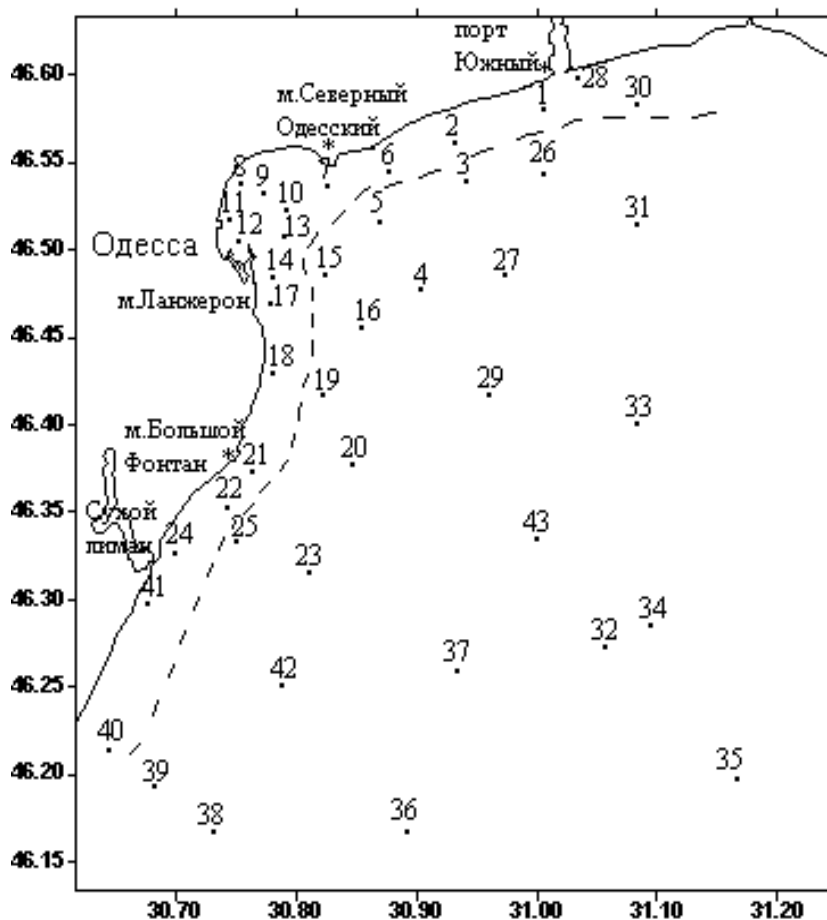


Рис. 3.1 – Схема расположения станций экологического мониторинга ОФ ИнБЮМ в Одесском районе СЗЧМ. Пунктирная линия выделяет условно прибрежные станции.

Осредненные значения концентраций загрязняющих веществ за весь период наблюдений приведены в табл. 3.1 и 3.2.

Анализируя средние значения гидрохимических характеристик необходимо отметить, что минимальные концентрации фосфатов (7 – 9 мкг/дм³) в поверхностном слое наблюдаются весной, а так же летом в мористой части акватории. Концентрация аммония минимальна весной (69 – 78 мкг/дм³) в мористой части акватории и достигает максимальных значений летом в прибрежной полосе моря (до 164 мкг/дм³ на поверхности и 190 мкг/дм³ в придонном слое). Минимум

Таблица 3.1 – Средние сезонные значения гидрохимических характеристик экологического состояния вод Одесского района

| Гидролог. сезон | Станции наблюдения | | O ₂ | БПК ₅ | НП | СПАВ | Zn | Ni |
|-----------------|--------------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | мг/дм ³ | мг/дм ³ | мг/дм ³ | мкг/дм ³ | мкг/дм ³ | мкг/дм ³ |
| Весна | прибрежные станции | поверхн. | 10,42 | 2,13 | 0,07 | 25,0 | 12,98 | 2,07 |
| | | дно | 9,54 | 1,33 | 0,05 | 21,0 | 19,06 | 3,66 |
| | мористые станции | поверхн. | 10,33 | 1,75 | 0,07 | 22,0 | 15,42 | 2,46 |
| | | дно | 9,97 | 1,34 | 0,04 | 23,0 | 19,81 | 3,16 |
| Лето | прибрежные станции | поверхн. | 8,34 | 2,46 | 0,07 | 37,0 | 26,84 | 2,47 |
| | | дно | 4,18 | 1,65 | 0,05 | 28,0 | 35,35 | 4,52 |
| | мористые станции | поверхн. | 8,85 | 2,25 | 0,06 | 33,0 | 19,08 | 2,02 |
| | | дно | 4,59 | 1,56 | 0,05 | 24,0 | 33,08 | 4,23 |
| Осень | прибрежные станции | поверхн. | 10,56 | 1,64 | 0,04 | 27,0 | 26,32 | 2,43 |
| | | дно | 9,52 | 1,05 | 0,03 | 27,0 | 37,95 | 4,33 |
| | мористые станции | поверхн. | 10,95 | 1,92 | 0,05 | 27,0 | 16,68 | 2,02 |
| | | дно | 9,66 | 1,62 | 0,03 | 28,0 | 21,26 | 3,82 |
| Зима | прибрежные станции | поверхн. | 12,34 | 1,19 | 0,04 | 11,0 | 7,30 | 2,60 |
| | | дно | 12,19 | 0,90 | 0,03 | 27,0 | 6,16 | 7,61 |
| | мористые станции | поверхн. | 12,74 | 1,66 | 0,05 | 27,0 | 6,54 | 2,11 |
| | | дно | 11,97 | 1,32 | 0,03 | 28,0 | 6,12 | 6,41 |

Таблица 3.2 – Средние сезонные значения концентраций биогенных веществ в водах Одесского района

| Гидролог. сезон | Станции наблюдения | | NH_4^+ | NO_2^- | NO_3^- | $N_{орг}$ | PO_4^{3-} | $P_{орг}$ |
|--------------------|-----------------------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | мкг/дм ³ | мкг/дм ³ | мкг/дм ³ | мкг/дм ³ | мкг/дм ³ | мкг/дм ³ |
| Весна | прибрежные станции | поверхн. | 83,6 | 1,3 | 21,0 | 578,3 | 9,0 | 21,8 |
| | | дно | 93,2 | 2,9 | 28,4 | 628,3 | 13,8 | 16,6 |
| | мористые станции | поверхн. | 69,2 | 1,4 | 28,1 | 594,7 | 7,1 | 19,3 |
| | | дно | 77,6 | 3,9 | 33,8 | 640,8 | 9,7 | 15,8 |
| Лето | прибрежные станции | поверхн. | 164,3 | 2,0 | 51,7 | 668,2 | 17,8 | 40,9 |
| | | дно | 189,5 | 5,9 | 50,4 | 648,7 | 29,5 | 40,0 |
| | мористые станции | поверхн. | 89,6 | 1,8 | 53,5 | 701,5 | 8,9 | 26,6 |
| | | дно | 114,1 | 6,6 | 81,1 | 670,2 | 21,4 | 23,9 |
| Осень | прибрежные станции | поверхн. | 109,9 | 7,2 | 73,4 | 729,0 | 27,4 | 21,4 |
| | | дно | 92,9 | 6,8 | 90,9 | 720,2 | 24,4 | 18,7 |
| | мористые станции | поверхн. | 95,1 | 3,8 | 41,3 | 690,8 | 20,0 | 21,7 |
| | | дно | 86,6 | 4,1 | 36,6 | 668,0 | 18,6 | 16,3 |
| Зима | прибрежные станции | поверхн. | 82,0 | 4,5 | 112,5 | 647,7 | 17,2 | 14,1 |
| | | дно | 96,5 | 2,5 | 88,3 | 642,7 | 12,0 | 16,8 |
| | мористые станции | поверхн. | 71,8 | 2,0 | 65,7 | 473,9 | 17,2 | 93,2 |
| | | дно | 129,3 | 0,4 | 167,3 | 376,3 | 11,8 | 14,5 |

содержания суммы нитритов и нитратов ($27 - 32 \text{ мкг/дм}^3$) отмечается весной, а максимум ($46 - 85 \text{ мкг/дм}^3$) – летом на глубинных станциях. В течение всего года концентрация аммонийного азота доминирует над нитратами.

Содержание органических форм азота и фосфора в весенне-летний период года преобладает над содержанием минеральных форм (в среднем в 2 – 3 раза для фосфора и 3 – 6 раз для азота). Осенью соотношение между органической и минеральной формами фосфора уменьшается до 1 и менее, а для азота соотношение остается прежним. Максимальное содержание органического азота (729 мкг/дм^3) и фосфора (49 мкг/дм^3) отмечается осенью в прибрежной зоне моря.

Соотношение между концентрацией в воде минеральных форм азота и фосфора N:P в течение года составляет в среднем 10:1, в то время как для органического вещества оно повышается до 30:1. Изменение соотношения в сторону азота для косного органического вещества может быть вызвано двумя причинами: меньшей скоростью минерализации органического азота по сравнению с органическим фосфором и поступлением органического азота из антропогенных источников и рек в гораздо больших количествах, чем органического фосфора. Соотношение минеральных форм азота и фосфора для антропогенных источников составляет 4:1, а для рек – 7:1.

В целом, в прибрежной полосе исследуемой акватории средние концентрации аммонийного азота и фосфатов во все сезоны года превышают концентрации характерные для мористой части акватории. Максимальных значений это превышение достигает в летний период в поверхностном слое и составляет 80 % для азота аммония и 100 % для фосфатов. Повышенные концентрации этих биогенных веществ в прибрежной зоне свидетельствуют в пользу существенной роли береговых антропогенных источников в эвтрофировании вод исследуемой акватории.

Пространственное распределение суммарного минерального азота, аммонийного азота и фосфатов приведено на рис. 3.2 – 3.4. Максимальные концентрации этих биогенных веществ наблюдаются в районе выпуска сточных вод СБО «Северная» и «Южная», ИМТП и ОПЗ. Прибрежные воды в весенне-летний период года содержат меньше нитратов и нитритов, чем воды открытой части акватории. И только осенью в прибрежной полосе их концентрации больше, чем в мористой части акватории на 78 % – в поверхностном слое и 148 % в придонном слое.

На протяжении всего периода наблюдений отмечается неравномерное распределение БПК₅ по площади акватории, что объясняется влиянием локальных источников поступления органического вещества (рис.3.5). Весной и летом величина БПК₅ в прибрежной полосе в фотическом слое на 16 % выше, чем в мористой части акватории и составляет в среднем

2,3 мг/л (при максимальных значениях до 8,5 мг/дм³), что выше установленного значения ПДК для данной характеристики [50]. Максимальные значения БПК₅ отмечены на станциях, находящихся под непосредственным влиянием береговых антропогенных источников загрязнения (СБО «Северная», «Южная», ОПЗ и ИМТП). Летом в придонном слое прибрежных вод при развитии ветрового прибрежного апвеллинга часто отмечается наличие гипоксии.

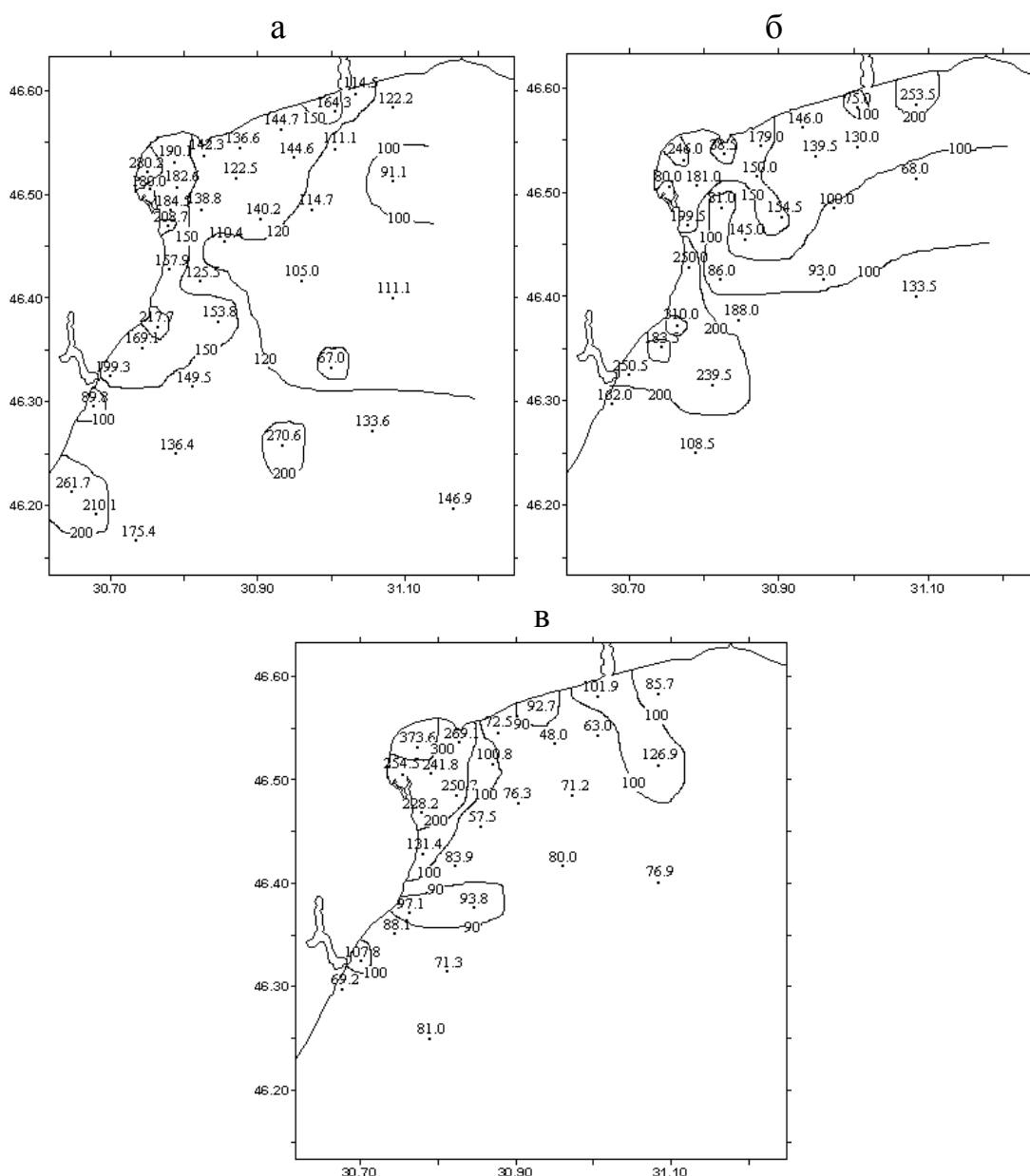


Рис. 3.2 – Среднее по глубине распределение минерального азота, мкг/дм³, за период 1989 – 1999 гг. (а), в августе 1994 г. (б) и в мае 1998 г. (в).

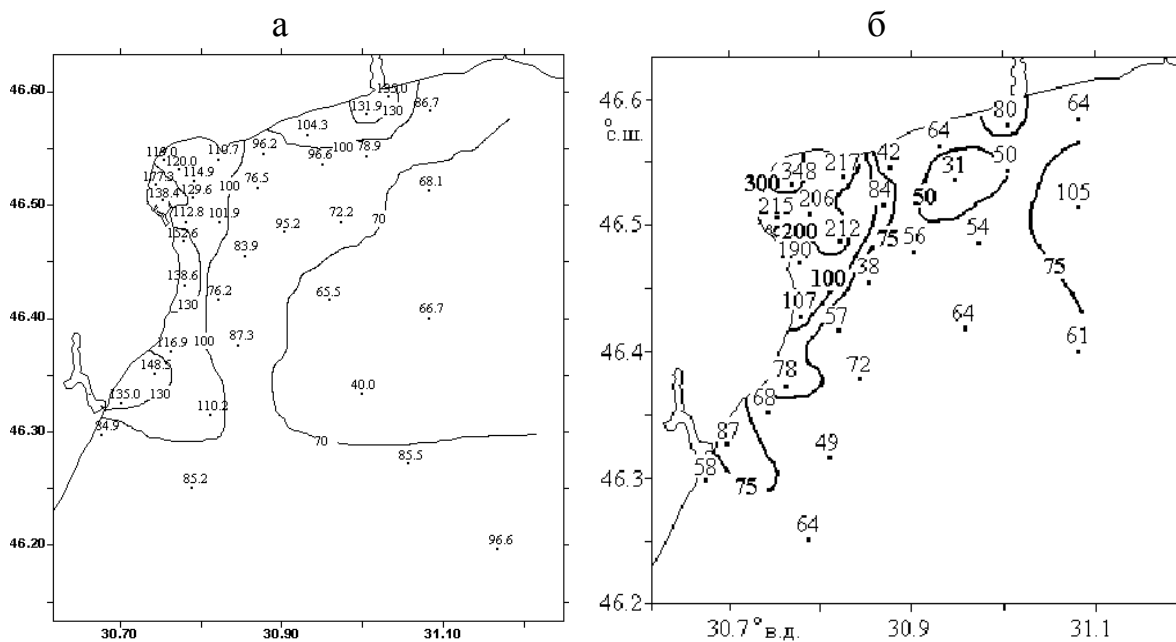


Рис. 3.3 – Распределение в поверхностном слое концентраций аммонийного азота, мкг/дм³: среднее за период 1989 – 1999 гг. (а) и в мае 1998 г. (б).

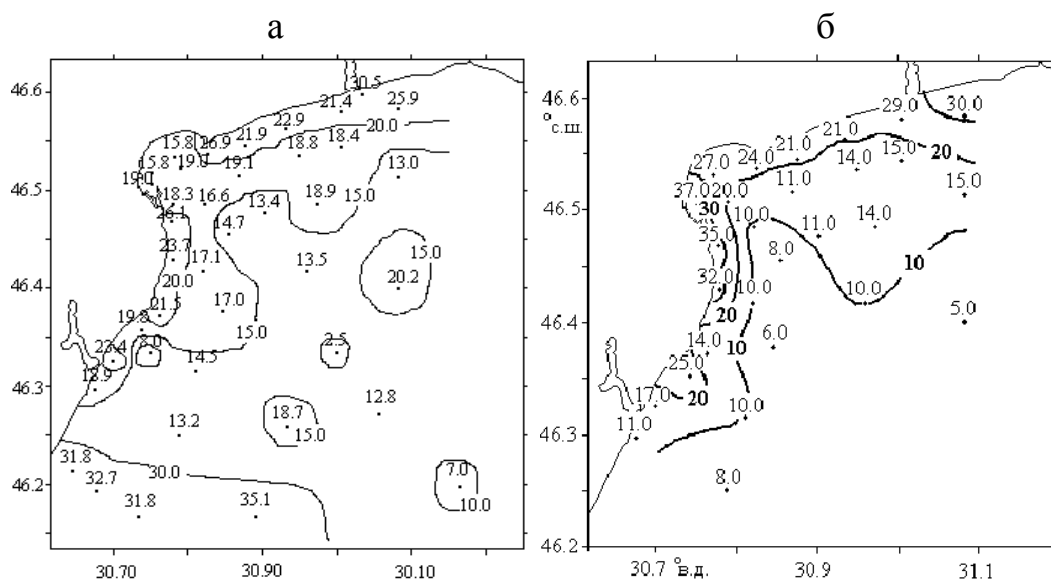


Рис. 3.4 – Распределение в поверхностном слое концентраций фосфатов, мкг/дм³: среднее за период 1989 – 1999 гг. (а) и в сентябре 1999 г. (б).

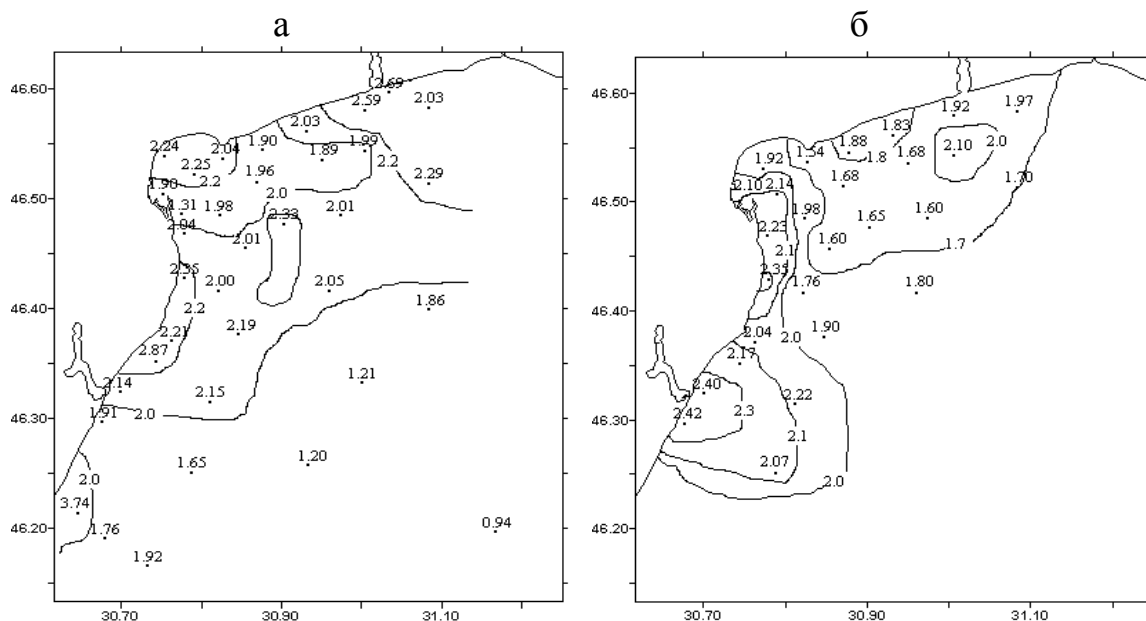


Рис. 3.5 – Среднее по глубине распределение БПК₅, мг/дм³, в период 1989 – 1999 гг. (а) и в мае 1998 г. (б).

Доминирующим видом загрязнения исследуемой акватории являются нефтепродукты, которые поступают с речным стоком и от береговых локальных источников. Среднее содержание нефтепродуктов в весенне-летний период в поверхностном слое вод прибрежной зоны составляет 0,07 мг/дм³, тогда как их содержание в водах мористой части акватории не превышает значение ПДК (0,05 мг/дм³) (см. рис. 3.6а). Максимальные концентрации зафиксированы в поверхностном слое в районе портов Одесса и Южный и достигают значения 5 ПДК. Поступление в морскую среду нефтепродуктов приводит к накоплению токсических веществ, которые в свою очередь оказывают отрицательное воздействие на гидробионты, ответственные за процессы самоочищения вод.

В прибрежной полосе концентрации СПАВ на 15 % выше, чем в мористой части акватории в течение всего года (рис. 3.6б). Источниками поступления этих загрязняющих веществ являются как постоянно функционирующие береговые антропогенные источники, так и неочищенные ливневые стоки.

Источниками поступления тяжелых металлов в морскую среду являются сточные воды промышленных предприятий и ливневые стоки. Имеет место накопление этих загрязняющих веществ в донных отложениях и, как результат сорбционного обмена, их концентрации в придонном слое вод прибрежной зоны выше, чем в мористой части акватории в течении всего периода наблюдений. Так, концентрация цинка

в придонном слое вод прибрежной зоны составляет в среднем $30,3 \text{ мкг/дм}^3$, что на 120 % больше чем в мористой части акватории. Концентрация никеля в прибрежной зоне в среднем на 25 % выше, чем в мористой части и составляет в среднем за весь период мониторинга $3,4 \text{ мкг/дм}^3$.

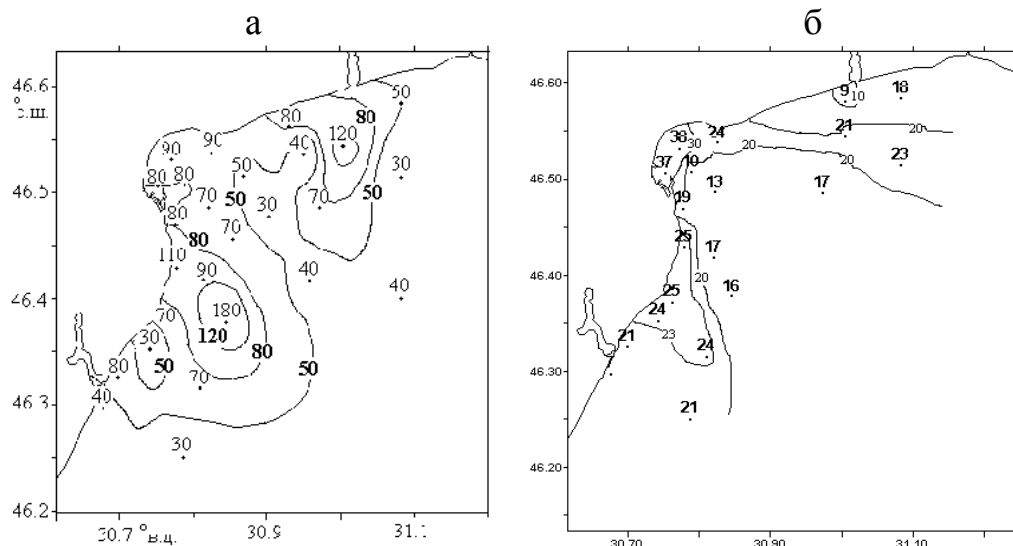


Рис. 3.6 – Распределение в поверхностном слое концентраций нефтепродуктов весной 1998 г. (а) и СПАВ в августе 1998 г. (в), мкг/дм^3 .

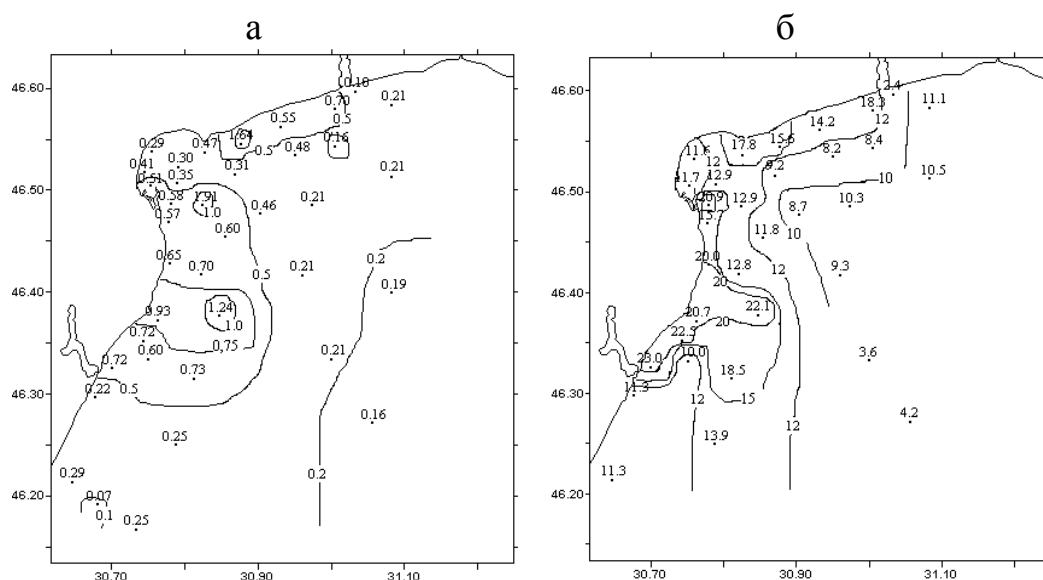


Рис. 3.7 – Среднее за период 1989 – 1999 гг. распределение концентраций кадмия (а) и цинка (б), мкг/дм^3 .

По данным [2], средние концентрации металлов в морской воде не превышают ПДК, однако в зонах непосредственного влияния основных источников загрязнения вод акватории устойчиво фиксируется содержание цинка 1 - 4 ПДК, ртути – 1 - 5 ПДК, а превышение ПДК для меди и никеля единичны. Превышение ПДК для кадмия отмечается только в летний период и составляет 1 - 4,5 ПДК. Как правило, преобладающей формой нахождения металлов в водах акватории является взвешенная. Следует отметить, что цинк, медь и никель относятся к элементам, необходимым для функционирования гидробионтов, а кадмий в жизнедеятельности организмов не участвует и является остротоксичным. Распределения кадмия, цинка и меди, полученные усреднением данных за весь период мониторинга, представлены на рис. 3.7, 3.8.

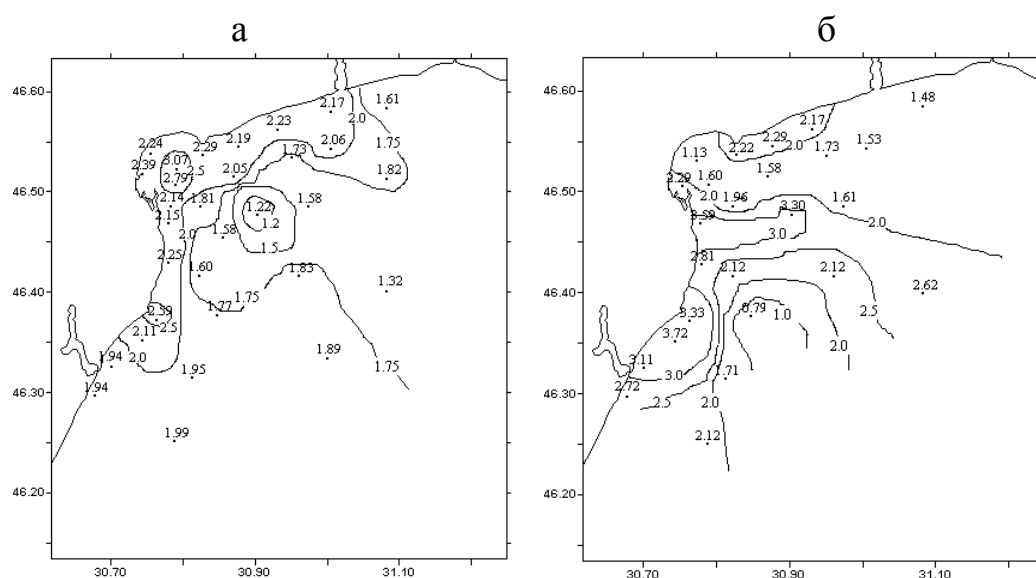


Рис. 3.8 – Распределение концентраций меди, мкг/дм^3 , в весенний период среднее за 1989 – 1999 гг. (а) и в сентябре 1996 г. (б).

3.2 Интегральная оценка качества морских вод

Под качеством морской воды будем подразумевать характеристику ее состава и свойств, которая определяет круговорот веществ, биопродуктивность, структуру и закономерности функционирования морской экосистемы, ее экологическое состояние и пригодность для различных типов водопользования [49]. Помимо гидрохимических характеристик естественного состояния морской экосистемы, качество вод

определяется содержанием в них загрязняющих веществ, поступление которых обусловлено хозяйственной деятельностью человека.

3.2.1 Оценка качества морской среды с использованием комплексного показателя ее экологического состояния

Для оценки качества морской среды Одесского района была использована методика, предложенная в работах [50, 51].

Комплексный показатель экологического состояния (КПЭС) характеризует экологическую устойчивость вод, а показатель экологической надежности (ЭН) – экологическую надежность вод.

Показатель КПЭС учитывает: концентрацию загрязняющего вещества в морской воде, значение его предельно допустимой концентрации (ПДК) и лимитирующий признак вредности (ЛВП). Для водоемов рыбохозяйственного назначения установлено ограничение для загрязняющих веществ, относящихся к одному и тому же ЛВП в виде:

$$\sum_{i=1}^n (P_i / H_i) < 1, \quad (3.1)$$

где P_i , H_i – соответственно концентрация и норма (ПДК) i -го вещества.

Поэтому для вредных веществ, относящихся к одному и тому же лимитирующему признаку вредности j (токсикологическому (т), санитарно-токсикологическому (с.-т.), органолептическому (орг), рыбохозяйственному (р) и общесанитарному (общ)), выражение для КПЭС имеет вид:

$$\text{КПЭС}_j = 1 - \sum_{i=1}^n (P_i / H_i)_j, \quad (3.2)$$

Для параметров общих требований, к которым относятся растворенный кислород, рН и др. показатели, КПЭС определяется по формуле

$$\text{КПЭС}_{\text{общ.тр.}} = (1/n) \sum_{i=1}^n \text{ПЭС}_i, \quad (3.3)$$

где n – количество параметров общих требований;

$ПЭС_i$ – показатель экологического состояния по i -му параметру общих требований.

Если норма представляет собой предельно допустимые значения параметра, то $ПЭС_i$ вычисляется по формуле:

$$ПЭС_i = (H_i - П_i) / H_i . \quad (3.4)$$

Если же норма является минимально допустимым значением (например, растворенный кислород), то используется соотношение:

$$ПЭС_i = (П_i - H_i) / H_i . \quad (3.5)$$

Среднее значение $КПЭС_{ср}$ находится как среднее арифметическое всех вычисленных значений $КПЭС$.

Чем меньше значение концентрации загрязняющего вещества в воде, тем выше значение $КПЭС$ и тем выше экологическая устойчивость вод к загрязнению.

Оценка экологического состояния водного объекта ведется по оценочным параметрам $КПЭС_{ср}$ и $КПЭС_{мин}$:

- если $КПЭС_{ср}$ и $КПЭС_{мин} > 0$, то экологическое состояние водного объекта оценивается как устойчивое;
- если $КПЭС_{ср} > 0$, а $КПЭС_{мин} < 0$, то экологическое состояние водного участка оценивается, как устойчивое в среднем с очагами неустойчивости (очагами неустойчивости могут быть, например, вещества, концентрация которых близка или равна ПДК);
- если $КПЭС_{ср}$ и $КПЭС_{мин} < 0$, то экологическое состояние водного объекта оценивается как неустойчивое.

Экологическая надежность водного объекта определяется как вероятность превышения $КПЭС_{ср}$ нулевого значения, соответствующего границе устойчивости:

$$ЭН = 1 - \chi^2 / (2N - M + 0,5 \chi^2) , \quad (3.6)$$

где χ^2 – значение функции «хи-квадрат» при доверительной вероятности, принимаемой равной 0,9;

N – общее число значений $КПЭС_{ср}$;

M – число значений $КПЭС_{ср}$ меньших критического нулевого значения.

Уровень надежности определяется следующим образом: уровень высокий – $ЭН \geq 0,9$; уровень приемлемый – $0,9 > ЭН \geq 0,8$; уровень низкий – $ЭН < 0,8$. Если расчет по формуле (3.6) дает отрицательные

значения, то ЭН принимается равной нулю. При неустойчивом экологическом состоянии экологическая надежность равна нулю.

В качестве исходных данных использованы результаты экологического мониторинга акватории Одесского района СЗЧМ, выполненного ОФ ИнБЮМ в 1988 – 1999 гг., обобщенные в табл. 3.1, 3.2.

Оценка качества вод проводилась по следующим показателям: БПК₅, содержание в воде растворенного кислорода, аммонийного азота, нитратов, нитритов, фосфатов, нефтепродуктов (НП), СПАВ и тяжелых металлов (меди, цинка, никеля, кадмия).

Среди нормативных критериев для различных типов водопользования более полно экологическим требованиям соответствуют рыбохозяйственные ПДК, поскольку при их определении исследования проводятся не только на рыбах, но и на водорослях, микроорганизмах, зоопланктоне, бентосных организмах, т.е. на группах различного таксономического ранга, играющих существенную роль в круговороте веществ в водной среде. Результаты расчетов КПЭС, с использованием нормативных параметров морских вод рыбохозяйственного назначения (табл. 3.3), для различных сезонов года приведены в табл. 3.4 [52].

Таблица 3.3 – Нормативные значения параметров морских вод [55]

| Параметр | O ₂ | БПК ₅ | NO ₃ ⁻ | NO ₂ ⁻ | NH ₄ ⁺ | PO ₄ ³⁻ | НП | СПАВ | Cu | Zn | Ni | Cd |
|-------------------------|----------------|------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------|------|-------|------|------|-------|
| ЛПВ | общ. тр. | с.-т. | токсикологический | | | | | | | | | |
| ПДК, мг/дм ³ | >4 | 2 | 40 | 0,08 | 2,26 | 11,5 | 0,05 | 0,1 | 0,005 | 0,05 | 0,01 | 0,005 |

Как видно из табл. 3.4, для всех сезонов года значения КПЭС_{ср} и КПЭС_{мин} являются отрицательными. Т.е. экологическое состояние водной среды исследуемой акватории в указанный период можно оценить как неустойчивое. Наибольший вклад в загрязнение морских вод дают такие вещества, как нефтепродукты, медь, цинк. Кроме того, высокие значения показателя БПК₅ свидетельствуют о высокой степени развития процесса эвтрофикации вод морской экосистемы.

Так как все значения КПЭС_{ср} отрицательны, то экологическая надежность в данном случае равна нулю. Оценивая сезонную изменчивость показателей экологического состояния, следует отметить, что в летний период степень неустойчивости вод была выше, чем весной и осенью.

Таблица 3.4 – Оценка экологического состояния морских вод Одесского района по рыбохозяйственным показателям

| Горизонт | КПЭС | Весна | Лето | Осень |
|-----------------|------------------------|-------|-------|-------|
| Прибрежная зона | | | | |
| поверхность | КПЭС _Т | -5,91 | -9,63 | -6,35 |
| | КПЭС _{с-Т} | 0,999 | 0,992 | 0,996 |
| | КПЭС _{общ.тр} | 0,09 | -0,61 | 0,13 |
| | КПЭС _{ср} | -1,61 | -3,08 | -1,74 |
| | КПЭС _{мин} | -5,91 | -9,63 | -6,56 |
| дно | КПЭС _Т | -6,56 | -8,91 | -7,75 |
| | КПЭС _{с-Т} | 0,998 | 0,996 | 0,99 |
| | КПЭС _{общ.тр} | 0,13 | -0,85 | 0,3 |
| | КПЭС _{ср} | -1,81 | -2,92 | -2,15 |
| | КПЭС _{мин} | -6,56 | -8,91 | -7,75 |
| Морские станции | | | | |
| поверхность | КПЭС _Т | -6,04 | -8,17 | -5,66 |
| | КПЭС _{с-Т} | 0,997 | 0,996 | 0,998 |
| | КПЭС _{общ.тр} | 0,1 | -0,15 | 0,07 |
| | КПЭС _{ср} | -1,65 | -2,44 | -1,53 |
| | КПЭС _{мин} | -6,04 | -8,17 | -5,66 |
| дно | КПЭС _Т | -6,41 | -8,89 | -7,42 |
| | КПЭС _{с-Т} | 0,998 | 0,996 | 0,998 |
| | КПЭС _{общ.тр} | 0,05 | -0,81 | -0,42 |
| | КПЭС _{ср} | -1,79 | -2,9 | -2,28 |
| | КПЭС _{мин} | -6,41 | -8,89 | -7,42 |

Для сравнения экологической неустойчивости вод прибрежной зоны и открытой части моря выполнялось осреднение сезонных средних и минимальных значений КПЭС (табл. 3.5). Из таблицы видно, что степень экологической неустойчивости морских вод в прибрежной зоне выше, чем с удалением от берега, что вполне закономерно, так как в прибрежной зоне сосредоточено большое количество источников загрязнения. Также, экологическая неустойчивость придонных вод более значительна, чем поверхностных, что может свидетельствовать о накоплении некоторых загрязняющих веществ в придонном слое воды и донных отложениях,

которые в свою очередь могут являться источником вторичного загрязнения воды.

Таблица 3.5 – Осредненные за годовой цикл значения КПЭС

| Горизонт | Прибрежная полоса | | Морские станции | |
|-------------|--|---|--|---|
| | $(\text{КПЭС}_{\text{ср}})_{\text{оср}}$ | $(\text{КПЭС}_{\text{мин}})_{\text{оср}}$ | $(\text{КПЭС}_{\text{ср}})_{\text{ос}}$ р | $(\text{КПЭС}_{\text{мин}})_{\text{оср}}$ |
| Поверхность | -2,14 | -7,30 | -1,87 | -6,62 |
| Дно | -2,29 | -7,74 | -2,32 | -7,57 |

Кроме оценки качества морских вод по рыбохозяйственным показателям, представляется интересной подобная оценка с использованием экологических нормативов. В качестве характеристик развития процесса эвтрофирования вод будем рассматривать концентрацию в фотическом слое PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- , БПК₅ и содержание O_2 в придонном слое акватории. При расчете КПЭС отнесем эти характеристики к группе параметров общих требований. В качестве экологических критериев нормирования качества морской воды в отношении содержания минеральных форм азота и фосфора были приняты не влияющие на скорость фотосинтеза их концентрации. Анализ литературных источников показал, что для большинства прибрежных морских экосистем, подверженных эвтрофированию, верхний предел лимитирующих продукцию фитопланктона концентраций минерального азота и фосфора соответствует $0,1 \text{ мгN/дм}^3$ и $0,015 \text{ мгP/дм}^3$, соответственно. Превышение этих концентраций в фотическом слое в период вегетации свидетельствует о том, что вследствие эвтрофирования продукция фитопланктона не регулируется содержанием в воде биогенных элементов. Для БПК₅ и содержания кислорода экологические нормативные значения были приняты в соответствии с данными табл. 3.3.

Во вторую группу экологических параметров для оценки качества морской среды выделим загрязняющие вещества токсического действия: нефтепродукты, СПАВ, медь, цинк, никель и кадмий, для которых используем нормативные показатели, соответствующие данным табл. 3.3. Результаты расчетов КПЭС для этих двух групп параметров приведены в табл. 3.6.

Из табл. 3.6 видно, что при использовании предложенных экологических нормативов экологическое состояние вод исследуемой акватории неудовлетворительно, как по степени загрязненности морских вод, так и по степени развития процесса их эвтрофирования.

В табл. 3.7 представлена оценка экологического состояния различных районов СЗЧМ по данным [51], а также рассчитанная оценка экологического состояния для Одесского района. Из таблицы видно, что Одесский район СЗЧМ имеет наиболее низкий показатель экологического состояния вод из всех рассматриваемых участков Черного моря.

Таблица 3.6 – Оценка экологического состояния морских вод по экологическим показателям

| Группа веществ | | Лето | Среднее за год |
|----------------------------|-------------|-------|----------------|
| Прибрежная зона | | | |
| Параметры общих требований | | -3,37 | -1,67 |
| Загрязняющие вещества | Поверхность | -9,23 | -7,03 |
| | Дно | -8,43 | -7,49 |
| Морские станции | | | |
| Параметры общих требований | | -0,92 | -0,7 |
| Загрязняющие вещества | Поверхность | -7,96 | -6,45 |
| | Дно | -8,53 | -7,3 |

Таблица 3.7 – Осредненная оценка экологического состояния различных районов СЗЧМ

| Район исследований | КПЭС _{ср} | КПЭС _{мин} | Оценка устойчивости | |
|------------------------------|--------------------|---------------------|--|------------|
| | | | устойчивость | надежность |
| Взморье Днестровского лимана | 0,56 | - 0,28 | устойчивое в среднем, с очагами неустойчивости | низкая |
| Взморье Дуная | - 0,31 | - 16,85 | неустойчивое | 0 |
| Днепровско-Бугский лиман | - 0,54 | - 1,24 | неустойчивое | 0 |
| Одесский район СЗЧМ | - 2,16 | - 7,31 | неустойчивое | 0 |

3.2.2 Оценка уровня эвтрофикации морской среды с использованием индекса E-TRIX

Для оценки уровня трофности вод использовался индекс эвтрофикации – E-TRIX [54]. Преимущество указанного показателя перед использованием комплексного показателя экологического состояния морской среды заключается в том, что при расчете индекса эвтрофикации E-TRIX используются стандартные гидрохимические и гидробиологические характеристики экологического состояния морских вод, определяющие первичную продукцию органического вещества или связанные с ней. Это позволяет корректно проводить сравнительный анализ экологического состояния вод различных морских акваторий по уровню их трофности.

Индекс E-TRIX является функцией концентраций общего фосфора, минеральных форм азота, растворенного кислорода и хлорофилла «а». Последний показатель характеризует наличную биомассу фитопланктона. Согласно [54], индекс эвтрофикации определяется по формуле:

$$E-TRIX = (\lg[Ch \cdot D\%O \cdot N \cdot P \cdot 1,5]) / 1,2, \quad (3.13)$$

где Ch – концентрация хлорофилла «а», мкг/дм³,

D%O – отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100 % насыщения;

N – концентрация растворенной формы минерального азота (мкг/дм³);

P – концентрация общего фосфора, мкг/дм³.

Значения индекса E-TRIX изменяются от 0 до 10, в соответствии с трофическими условиями. Уровни трофности и характеристика качества вод, в зависимости от величины E-TRIX, представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Категории трофности и характеристика качества вод в зависимости от значений E-TRIX

| Значения E-TRIX | Уровень трофности | Качество вод |
|-----------------|-------------------|--------------------|
| < 4 | Низкий | Высокое |
| 4 – 5 | Средний | Хорошее |
| 5 – 6 | Высокий | Удовлетворительное |
| 6 – 10 | Очень высокий | Плохое |

При значениях E-TRIX превышающих 6, исследуемые районы моря характеризуются высоким содержанием биогенных веществ, низкой прозрачностью и возможностью возникновения гипоксии в придонных слоях воды. И, наоборот, при индексе эвтрофикации менее 4,

концентрация главных биогенных элементов незначительная, воды хорошо аэрированы по всей толще и обладают высокой прозрачностью [55].

Средние значения химико-биологических характеристик качества вод, используемых при расчетах индекса эвтрофикации представлены в табл. 3.9.

Индексы E-TRIX рассчитывались по данным наблюдений для каждого сезона (весна, лето, осень), отдельно для прибрежных и мористых станций. Результаты расчета представлены в табл. 3.10 [56]. Из таблицы видно, что значение индекса эвтрофикации изменяется в незначительных пределах. Максимальные значения индекса отмечаются в летне-осенний период года в прибрежной зоне Одесского района, что связано со значительным вкладом береговых антропогенных источников загрязнения в эвтрофирование вод акватории. Весной индекс эвтрофикации для прибрежных и морских станций отличается незначительно, что объясняется доминирующим влиянием речного стока на весь регион.

Таблица 3.9 – Осредненные за 1988 – 1999 гг. значения химико-биологических характеристик поверхностного слоя вод Одесского района СЗЧМ

| Показатели | Единицы измерения | Прибрежные станции | | | Мористые станции | | |
|-----------------------|---------------------|--------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| | | весна | лето | осень | весна | лето | осень |
| Температура | °С | 14,6 | 20,7 | 10,7 | 15,9 | 21,8 | 12,4 |
| Соленость | ‰ | 12,20 | 15,26 | 15,30 | 12,97 | 15,42 | 15,50 |
| Растворенный кислород | мг/дм ³ | 10,42 | 8,34 | 10,56 | 10,33 | 8,85 | 10,95 |
| Насыщение кислородом | % | 118,3 | 112,4 | 112,9 | 122,0 | 119,7 | 119,3 |
| Хлорофилл «а» | мг/м ³ | 4,781 | 4,924 | 6,892 | 5,145 | 4,241 | 6,430 |
| Азот минеральный | мкг/дм ³ | 105,9 | 218,0 | 190,5 | 98,7 | 144,9 | 140,2 |
| Фосфор общий | мкг/дм ³ | 30,8 | 58,7 | 48,8 | 26,3 | 35,5 | 41,7 |

Таблица 3.10 – Рассчитанные индексы эвтрофикации E-TRIX для вод Одесского района СЗЧМ

| Сезон наблюдений | Прибрежные станции | Мористые станции |
|------------------|--------------------|------------------|
| Весна | 5,80 | 5,81 |
| Лето | 6,16 | 5,94 |

| | | |
|-------|------|------|
| Осень | 6,18 | 6,13 |
|-------|------|------|

В табл. 3.11 представлены значения индекса эвтрофикации E-TRIX для разных районов Черного моря по данным [55, 57], а также рассчитанные для Одесского района СЗЧМ. Из таблицы следует, что по степени эвтрофирования воды Одесского района СЗЧМ уступают лишь водам Варненского залива и близки к водам Болгарского взморья Черного моря. Характерное для района значение индекса E-TRIX составляет 6.0. Индекс эвтрофикации вод Севастопольского взморья и даже Севастопольской бухты, на берегах которой находится значительное количество антропогенных источников эвтрофирования вод, существенно меньше, чем в Одесском районе, что свидетельствует в пользу значительного влияния речного стока на эвтрофирование вод исследуемой акватории.

Таблица 3.11 – Значения индекса эвтрофикации для разных районов Черного моря

| Район исследования | Значение индекса эвтрофикации E-TRIX |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Варненский залив | 7,35 |
| Галата | 5,18 |
| Мыс Калиакра | 5,07 |
| Шкорпиловзи | 4,96 |
| Болгарское взморье | 6.19 |
| Севастопольское взморье | 2,46 |
| Севастопольская бухта | 3,62 |
| Одесский район | 6,00 |

ГЛАВА 4

ОЦЕНКА РОЛИ БЕРЕГОВЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ФОРМИРОВАНИИ КАЧЕСТВА ВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Описание численной математической модели формирования качества вод шельфовых морских акваторий

Для определения степени влияния речного стока и береговых антропогенных источников на сформированный уровень трофности и загрязнение вод СЗЧМ веществами токсического действия в работе использована численная трехмерная нестационарная математическая модель формирования качества вод СЗЧМ. Модель состоит из трех блоков (подмоделей):

- трехмерная гидротермодинамическая модель, описывающая изменчивость термохалинной структуры и динамику вод, адвективный перенос и турбулентную диффузию примеси в морской среде при различных гидрометеорологических условиях, с учетом морфологических особенностей бассейна (батиметрии, конфигурации берегов) и речного стока;
- блок самоочищения вод от загрязняющих веществ, которые не свойственны морской среде, т.е. поступают в экосистему из внешних, как правило, антропогенных источников;
- блок эвтрофикации и кислородного режима вод, в котором описаны естественные химико-биологические процессы, определяющие баланс веществ и энергии в экосистеме, степень трофности и сапробности ее вод.

Гидродинамический блок модели представляет собой известную модель Хесса МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) [58-60] для эстуарных зон, дополненную блоком переноса пассивной, консервативной примеси с использованием транспортных конечно-разностных схем. Эта модель позволяет рассчитывать трехмерную термохалинную структуру вод, интенсивность турбулентного обмена, а также ветровые (дрейфовые и компенсационные), плотностные, стоковые и приливные течения в шельфовой зоне моря.

Основные уравнения гидродинамического блока модели записываются следующим образом:

$$u'_t + (uu)'_x + (uv)'_y + (uw)'_z = -\alpha_0 P'_x + fv + (2A_h u'_x)'_x + (A_h [v'_x + u'_y])'_y + (A_v u'_z)'_z, \quad (4.1)$$

$$v'_t + (vu)'_x + (vv)'_y + (vw)'_z = -\alpha_0 P'_y - fu + (2A_h v'_y)'_y + (A_h [u'_y + v'_x])'_x + (A_v v'_z)'_z, \quad (4.2)$$

$$u'_x + v'_y + w'_z = 0, \quad (4.3)$$

$$S'_t + (uS - D_h S'_x)'_x + (vS - D_h S'_y)'_y + (wS - D_v S'_z)'_z = 0, \quad (4.4)$$

$$T'_t + (uT - D_h T'_x)'_x + (vT - D_h T'_y)'_y + (wT - D_v T'_z)'_z = R, \quad (4.5)$$

$$P'_z = -\rho g, \quad (4.6)$$

$$\rho = \rho_0 [1 + F_p(S, T)], \quad (4.7)$$

где u , v и w – компоненты вектора скорости течения в направлениях x , y и z , соответственно; t – время; f – параметр Кориолиса; P – давление; g – ускорение свободного падения; $\alpha_0 = 1/\rho_0$ – постоянный удельный объем воды; ρ – плотность воды; A_h и A_v – коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена импульсом; D_h , D_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии тепла и примеси; T – температура и S – соленость воды; R – внутренний источник тепла. Индексы $'_x$, $'_y$, $'_z$ и $'_t$ означают соответствующие производные.

Для улучшения вычислительных свойств модели и более точного описания вертикальной динамической и термохалинной структуры вод в области малых глубин, уравнения модели переводились в σ - систему координат по вертикали с использованием следующего выражения:

$$\sigma = -(h - z)/H; \quad H = h + d, \quad (4.8)$$

где σ – новая координата, изменяющаяся от поверхности до дна в пределах $[0, -1]$; H – полная глубина; d – невозмущенная глубина; h – возмущение уровенной поверхности.

Метод решения гидродинамической задачи предусматривает расщепление полной скорости течений на среднюю по глубине скорость

(баротропная составляющая) и отклонения от нее на каждом расчетном горизонте (бароклинная составляющая). Это позволяет использовать при численном решении уравнений динамики различные временные шаги для баротропной и бароклинной составляющих горизонтальной скорости течений, поскольку первая связана с колебаниями уровня моря при прохождении длинных гравитационных волн и изменяется более быстро, чем вторая.

Компоненты баротропной составляющей скорости определяются как

$$U = \int_{-1}^0 u d\sigma \quad \text{и} \quad V = \int_{-1}^0 v d\sigma, \quad (4.9)$$

а проинтегрированные по вертикали уравнения движения имеют вид:

$$(HU)'_t + (H\theta_{uu}UU)'_x + (H\theta_{uv}UV)'_y = -gHh'_x - \alpha_0 HP_{a'x} - HG_x^* + fHV + (2A_h HU'_x)'_x + (A_h H[V'_x + U'_y])'_y + \tau_{sx} - \tau_{bx}, \quad (4.10)$$

$$(HV)'_t + (H\theta_{uv}UV)'_x + (H\theta_{vv}VV)'_y = -gHh'_y - \alpha_0 HP_{a'y} - HG_y^* - fHU + (2A_h HV'_y)'_y + (A_h H[V'_x + U'_y])'_x + \tau_{sy} - \tau_{by}, \quad (4.11)$$

$$\text{где } G_x^* = \int_{-1}^0 G_x d\sigma, \quad G_x = \alpha_0 g \left\{ \left[\begin{array}{c} 0 \\ H \int (\rho - \rho_0) d\sigma \\ \sigma \end{array} \right]'_x + (h'_x + \sigma H'_x)(\rho - \rho_0) \right\};$$

$$G_y^* = \int_{-1}^0 G_y d\sigma, \quad G_y = \alpha_0 g \left\{ \left[\begin{array}{c} 0 \\ H \int (\rho - \rho_0) d\sigma \\ \sigma \end{array} \right]'_y + g(h'_y + \sigma H'_y)(\rho - \rho_0) \right\};$$

$$\theta_{uu} = \int_{-1}^0 (uu/UU) d\sigma; \quad \theta_{uv} = \int_{-1}^0 (uv/UV) d\sigma; \quad \theta_{vv} = \int_{-1}^0 (vv/VV) d\sigma;$$

$$\theta_{su} = \int_{-1}^0 (u/U)(u/U) d\sigma; \quad \theta_{sv} = \int_{-1}^0 (v/V)(v/V) d\sigma.$$

Уравнение неразрывности для баротропной составляющей:

$$h'_t + (HU)'_x + (HV)'_y = 0, \quad (4.12)$$

Бароклинные компоненты вектора скорости определяются как отклонения от средней по глубине скорости $u' = u - U$ и $v' = v - V$, а уравнения для них получают вычитанием уравнений для баротропной составляющей скорости из уравнений для полной скорости:

$$\begin{aligned}
& (Hu')_t + (H[uu - \theta_{uu}UU])'_x + (H[uv - \theta_{uv}UV])'_y + (\tilde{w}u')_{,\sigma} = \\
& HG_x^* - HG_x + fHv' + (2A_h Hu'_{,x})'_x + (A_h H[v'_{,x} + u'_{,y}])'_y + \\
& H^{-1}(A_v u'_{,\sigma})_{,\sigma} - \tau_{sx} + \tau_{bx}; \tag{4.13}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (Hv')_t + (H[uv - \theta_{uv}UV])'_x + (H(vv - \theta_{vv}VV))'_y + (\tilde{w}v')_{,\sigma} = \\
& HG_y^* - HG_y - fHu' + (2A_h Hv'_{,y})'_y + (A_h H[v'_{,x} + u'_{,y}])'_x + \\
& H^{-1}(A_v v'_{,\sigma})_{,\sigma} - \tau_{sy} + \tau_{by}; \tag{4.14}
\end{aligned}$$

Уравнение неразрывности для бароклинной составляющей:

$$(Hu')'_x + (Hv')'_y + H^{-1}(\tilde{w})'_{,\sigma} = 0. \tag{4.15}$$

В уравнениях (4.13) - (4.15) \tilde{w} - вертикальная скорость, вычисляемая как:

$$\tilde{w} = Hd\sigma/dt = w - (1 + \sigma)h'_t - u(h'_{,x} + \sigma H'_{,x}) - v(h'_{,y} + \sigma H'_{,y}). \tag{4.16}$$

Уравнения сохранения тепла (4.4) и солей (4.5) в σ -системе координат принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}
& (HT)_t + (H[uT - D_h T_{,x}])'_x + (H[vT - D_h T_{,y}])'_y \\
& + (\tilde{w}T - H^{-1}D_v T_{,\sigma})_{,\sigma} = HR. \tag{4.17}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (HS)_t + (H[uS - D_h S_{,x}])'_x + (H[vS - D_h S_{,y}])'_y \\
& + (\tilde{w}S - H^{-1}D_v S_{,\sigma})_{,\sigma} = 0. \tag{4.18}
\end{aligned}$$

Вертикальная турбулентная вязкость аппроксимируется на основе полуэмпирической теории турбулентности как функция локального вертикального сдвига скорости и устойчивости водной колонки [59]:

$$A_v = A_{v0} + A_z \left[C_{R0} (1 + C_{R1} R_i)^{-C_{R2}} \right], \tag{4.19}$$

$$D_v = D_{v0} + A_z \left[C_{R3} (1 + C_{R4} R_i)^{-C_{R5}} \right], \tag{4.20}$$

$$\text{где } A_z = [\kappa z(1 - z/H)]^2 (u'_z{}^2 + v'_z{}^2)^{1/2}. \quad (4.21)$$

Здесь $\kappa = 0.4$ - постоянная Кармана; $R_i = -g\rho'_z / [\rho_0(u'_z{}^2 + v'_z{}^2)]$ - число Ричардсона; A_{v0} - пороговая вязкость; D_{v0} - пороговая диффузия; $C_{R0}, C_{R1}, C_{R2}, C_{R3}, C_{R4}$ и C_{R5} - константы, принимаемые равными 1.0; 10.0; 0.5; 1.0; 3.33 и 1.5, соответственно [61].

Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена рассчитываются исходя из значения локального сдвига горизонтальной скорости и пространственного шага горизонтальной конечно-разностной сетки ΔL [62]:

$$A_h = A_{h0} + C_{AH} \Delta L^2 \left[2(u'_{x'}{}^2 + v'_{y'}{}^2) + (U'_{y'} + V'_{x'})^2 \right]^{1/2}, \quad (4.22)$$

$$D_h = A_h, \quad (4.23)$$

где коэффициент $C_{AH} = 0.01$ и $A_{h0} = 1.0 \text{ м}^2/\text{с}$ - фоновая величина.

Объединение химико-биологической части модели с гидродинамической в единую модель качества вод осуществляется на основе уравнения переноса неконсервативной примеси:

$$\begin{aligned} & (HC_i)_{,t} + (H[uC_i - D_h(C_i)_{,x}])_{,x} + (H[vC_i - D_h(C_i)_{,y}])_{,y} \\ & + ((\tilde{w} + w_{gi})C_i - H^{-1}D_v(C_i)_{,\sigma})_{,\sigma} = HF_i(\vec{C}, x, y, z, t)_i \\ & + HQ_i(x, y, z, t). \end{aligned} \quad (4.24)$$

Здесь \vec{C} - вектор-функция переменных состояния экосистемы ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), элементами которой являются концентрации (биомассы) C_i моделируемых компонентов экосистемы или загрязняющих веществ; w_{gi} - скорость гравитационного осаждения примеси; F_i - функции неконсервативности, представляющие собой составленные на основе балансового подхода алгебраические суммы членов, которые описывают локальные потоки i -го вещества между компонентами модели, обусловленные различными (био)химическими реакциями и биологическими взаимодействиями: $\partial C_i / \partial t = F_i$; Q_i - приток вещества от внешних источников, включая антропогенные.

Функции неконсервативности F_i , в зависимости от типа рассматриваемых веществ, определяются в блоках самоочищения или эвтрофикации. На каждом шаге по времени решается система уравнений

переноса неконсервативных субстанций. Число уравнений типа (4.24), составляющих эту систему, соответствует количеству моделируемых компонентов экосистемы или типов загрязняющих веществ.

Граничные условия в модели определяются следующим образом.

На поверхности моря ($z = 0$):

$$(\tau_{sx}, \tau_{sy}) = \rho A_v (u'_{1z}, v'_{1z}); D_v T'_{1z} = Q_T / (\rho C_w); \quad (4.25)$$

$$w_{gi} C_i - D_v (C_i)'_{1z} = Q_{ci}^{top}.$$

$D_v S'_{1z} = Q_s^{top}$ – в точках выброса сточных вод антропогенными источниками в поверхностный слой и $D_v S'_{1z} = 0$ – во всех остальных точках расчетной области.

Здесь, τ_{sx}, τ_{sy} – компоненты вектора касательного напряжения трения ветра; Q_T – поток тепла, вычисляемый на основе метеорологических данных; Q_{ci}^{top} – поток i -той примеси через водную поверхность; C_w – удельная теплоемкость воды; Q_s^{top} – поток соли (фактически распреснение) в точках сброса сточных вод в поверхностный слой береговыми антропогенными источниками.

На дне ($z = H$):

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho A_v (u'_{1z}, v'_{1z}); w_{gi} C_i - D_v (C_i)'_{1z} = Q_{ci}^{bot}; \quad (4.26)$$

$$D_v T'_{1z} = \left[C_{b1} + C_{b2} (u_b^2 + v_b^2)^{1/2} \right] (T_b - T),$$

$D_v S'_{1z} = Q_s^{top}$ – в точках выброса сточных вод антропогенными источниками (СБО) в придонный слой и $D_v S'_{1z} = 0$ – во всех остальных точках расчетной области.

Здесь τ_{bx}, τ_{by} – компоненты вектора касательного напряжения придонного трения; u_b и v_b – составляющие вектора придонной скорости течения; C_{b1}, C_{b2} – коэффициенты обмена, принимаемые равными 10^{-6} м/с и 0,003, соответственно; T_b – температура морского дна; Q_{ci}^{bot} – поток i -той примеси через границу «вода – донные отложения»; Q_s^{top} – поток соли (фактически распреснение) в точках сброса сточных вод СБО в придонный слой.

Ветровые напряжения трения на верхней границе (воздух-вода) записываются как $\tau_{sx} = C_a W_{10} W_x$, $\tau_{sy} = C_a W_{10} W_y$, где W_x и W_y – составляющие вектора скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря по

осям x и y , соответственно; W_{10} – модуль скорости ветра на высоте 10 м; C_a – коэффициент поверхностного трения:

$$C_a = \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-3}, & W_{10} \leq 7,5 \text{ м/с} \\ (0,8 + 0,065W_{10}) \cdot 10^{-3} & W_{10} > 7,5 \text{ м/с}. \end{cases}$$

Придонные напряжения трения на нижней границе (вода-дно):

$$\tau_{bx} = \Phi u_b \text{ и } \tau_{by} = \Phi v_b, \text{ где } \Phi = C_b (u_b^2 + v_b^2)^{1/2}.$$

Здесь u_b и v_b – составляющие вектора придонной скорости течения; C_b – коэффициент донного трения, который находится по формуле

$$C_b = \max(k^2 [\ln(z_b/z_{os})]^{-2}, 2,5 \cdot 10^{-3}),$$

где z_b – расстояние по вертикали от дна до точки, в которой определяется коэффициент; $z_{os} = 0,003$ м – параметр шероховатости донной поверхности, $k = 0,4$ – постоянная Кармана.

На фронтальных морских границах ставится условие прохождения через нее длинных гравитационных волн:

$$h = h_0 + \vec{V}\vec{n}\sqrt{H/g}, \quad (4.27)$$

где h_0 – возмущение уровня в открытом море, задаваемое на основе данных наблюдений; $\vec{V}\vec{n}$ – проекция вектора течений, рассчитанного в граничных точках области, на внешнюю нормаль \vec{n} к открытой боковой границе.

Для температуры и солености условия формулируются следующим образом: если поток входит в расчетную область, то на границе с открытым морем задаются фоновые значения температуры, солености и примеси (T^* , S^* , C_i^*), характерные для открытого моря; в противном случае значения моделируемых переменных экстраполируются из расчетной области с помощью упрощенного уравнения адвекции:

$$\begin{aligned}
T_o = T^*; S_o = S^*, C_{oi} = C_i^* & \quad \text{если } \vec{v}\vec{n} \leq 0 \\
\frac{\partial T_o}{\partial t} = -\vec{v}\vec{n} \frac{\partial T}{\partial \vec{n}}; \frac{\partial S_o}{\partial t} = -\vec{v}\vec{n} \frac{\partial S}{\partial \vec{n}}, \frac{\partial C_{oi}}{\partial t} = -\vec{v}\vec{n} \frac{\partial C_i}{\partial \vec{n}} & \quad \text{если } \vec{v}\vec{n} > 0
\end{aligned} \quad (4.28)$$

где T_o, S_o, C_{oi} - значения моделируемых переменных на открытой морской границе.

На твердой границе в точках впадения рек задаются расходы воды Q_r , а также вертикальные профили бароклинной скорости, температуры, солёности и примеси:

$$\begin{aligned}
U &= Q_r / (\Delta L H) \text{ и } V = Q_r / (\Delta L H); \\
u' &= u_{top} \cos(\pi z / H) \text{ и } v' = v_{top} \cos(\pi z / H); \\
T &= T_{top} + (T_{top} - T_{bot}) (1 - \cos(\pi z / H)); \\
S &= S_{top} + (S_{top} - S_{bot}) (1 - \cos(\pi z / H)); \\
C_i &= C_i^{top} + (C_i^{top} - C_i^{bot}) (1 - \cos(\pi z / H))
\end{aligned} \quad (4.29)$$

Здесь, ΔL – горизонтальный пространственный шаг расчетной сетки; величины с индексом “top” соответствуют поверхностному слою воды, тогда как с индексом “bot” – придонному слою.

Потоки $Q_{ci}^{top}; Q_{ci}^{bot}$ для конкретных типов загрязняющих веществ задаются в точках сбросов антропогенных источников загрязнения

$$Q_{ci}^{top,bot} = \frac{Q_{ai} C_i^a}{\Delta L^2}, \quad (4.30)$$

(C_i^a, Q_{ai} – концентрация примеси в сбросных водах антропогенного источника ($г/м^3$) и его расход ($м^3/с$), соответственно) и рассчитываются в химико-биологическом блоке модели во всех остальных точках расчетной области при решении задачи эвтрофикации.

Для повышения вычислительной устойчивости, на открытых морских границах принимаются равными нулю: ускорение Кориолиса, ветровые напряжения трения, горизонтальные градиенты атмосферного давления и плотности. При этом используется специальная мультипликативная краевая функция, которая принимает нулевые значения в пограничных расчетных ячейках, 0,5 – в ячейках на удалении одного шага от граничных и 1 – во всех остальных ячейках.

Нелинейные адвективные члены уравнений движения также принимаются равными нулю на открытой морской границе.

Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели выполняется с использованием неявных конечно-разностных схем. Программная реализация гидродинамической модели позволяет рассчитывать как суммарные течения, так и выделять отдельно их ветровую, термохалинную и стоковую составляющие. С заданной временной дискретностью в ходе счета модель усваивает новую информацию о скорости и направлении ветра, температуре воздуха, расходах рек, температуре, солености и загрязненности речных вод; термохалинной стратификации, уровне моря и фоновых концентрациях примеси в отдельных точках морской границы. Между вводимыми дискретными значениями выполняется линейная интерполяция: для метеорологических и речных параметров – во времени; для значений уровня моря, вертикального распределения температуры, солености воды и фоновой концентрации примеси на открытых границах – в пространстве и во времени.

Блок самоочищения вод представляет собой набор функциональных зависимостей, описывающих скорости процессов деградации и деструкции загрязняющих веществ в морской среде. Как правило, это загрязняющие вещества токсического действия, для которых применим критерий предельно-допустимых концентраций (ПДК).

Задача самоочищения вод исследуемой акватории моря от загрязняющих веществ антропогенного происхождения является корректной в случае локального характера источника загрязнения и отсутствия в водной среде естественных значимых источников поступления загрязняющих веществ. Первое условие означает, что влияние источника загрязнения на качество вод и функционирование экосистемы прослеживается лишь в локальной области, пространственные масштабы которой во много раз меньше исследуемой морской акватории. Примером загрязняющих веществ удовлетворяющих второму условию могут служить нефть и нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), фенолы, тяжелые металлы и другие токсиканты. Попадая в морскую среду эти вещества вовлекаются в различного рода физические, химические, биологические и смешанные процессы, в результате чего трансформируются в пассивные (по отношению к биотическим составляющим экосистемы) химические элементы и соединения, либо выводятся из водной среды. К рассматриваемому типу загрязняющих веществ относится и один из наиболее опасных для человека биологических загрязнителей – патогенные бактерии, которые попадая в морскую среду подвергаются биодеградации.

В первом приближении, при построении блока самоочищения вод от неконсервативных загрязняющих веществ и патогенной микрофлоры предполагают, что деструкция загрязняющих веществ в результате их физико-химической и (или) биохимической трансформации описывается кинетическим уравнением реакции 1-го порядка:

$$F_i = \left. \frac{dC_i}{dt} \right|_{\text{local}} = -K_{ci}C_i, \quad (4.31)$$

где F_i – функция неконсервативности примеси в уравнении (4.24); K_{ci} – коэффициент неконсервативности (деструкции) загрязняющего вещества, представляющий собой удельную скорость его трансформации в результате совокупного действия химических, физико- и биохимических процессов, без детализации их вкладов. Его значение для конкретных типов загрязняющих веществ может быть взято из литературных источников, либо определено эмпирическим путем с использованием зависимостей вида [60]:

$$K_{ci} = \frac{1}{t - t'} \ln \frac{C_i^0}{C_i^t} \text{ или } K_{ci} = \ln 2 / \tau_i, \quad (4.32)$$

где C_i^0 – начальная концентрация загрязняющего вещества i ; C_i^t – его концентрация через время t ; t' – время, в течение которого практически не происходит изменения концентрации C_i^0 (время адаптации микроорганизмов), τ_i – период полураспада вещества i .

Блок эвтрофикации вод включает в себя 11 химико-биологических элементов: фитопланктон – V_f , фосфаты – C_{PO_4} , азот аммония – C_{NH_4} , азот нитратов – C_{NO_3} , растворенный органический фосфор – C_{DOP} и азот – C_{DON} , взвешенный органический фосфор – C_{POP} и азот – C_{PON} , детритная – V_{org}^{det} и растворенная – V_{org}^{dis} формы кислородного эквивалента косного органического вещества (БПК, перманганатная окисляемость), растворенный кислород – C_{O_2} . Азот нитритов включается в нитраты. Рассчитывается также показатель БПК₅. Диаграмма связей между элементами модели представлена на рис. 4.1.

Система уравнений блока эвтрофикации для локальной точки пространства записывается следующим образом [60, 63].

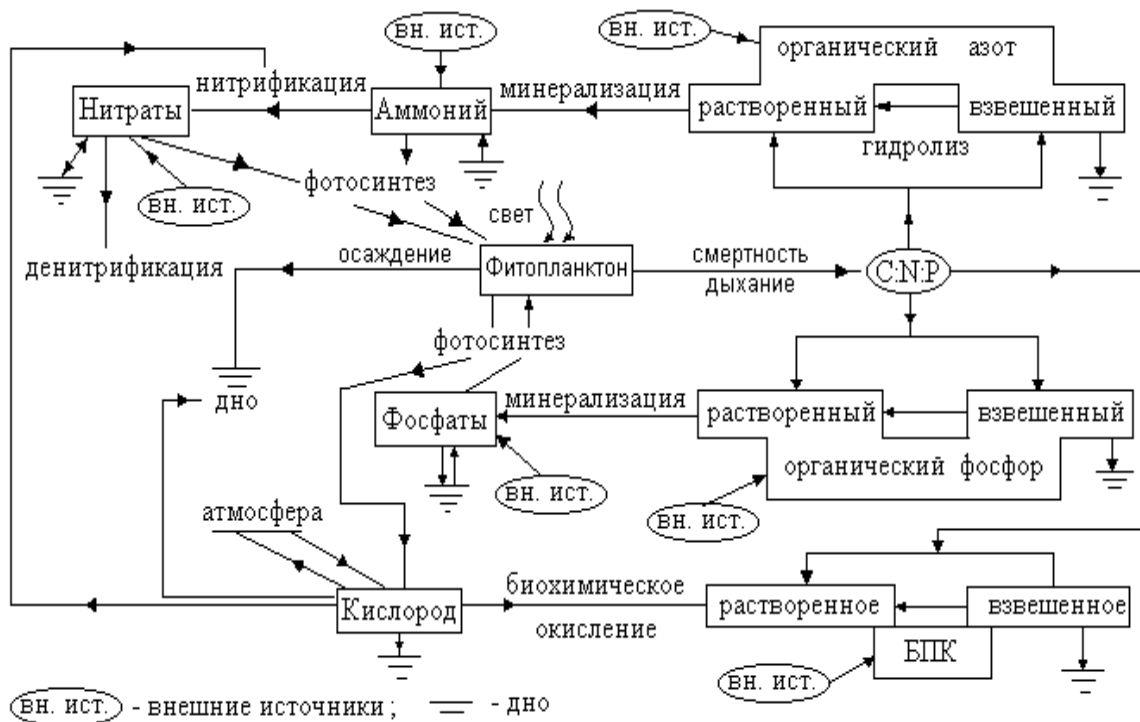


Рис. 4.1 – Диаграмма связей между элементами блока эвтрофикации модели качества вод северо-западной части Черного моря.

Фитопланктон, гС/м³.

$$\left. \frac{dB_f}{dt} \right|_{local} = (\sigma_f - \phi_f - \mu_f) B_f, \quad (4.33)$$

где σ_f – удельная скорость роста, 1/сут; ϕ_f – удельная скорость метаболизма (дыхания), 1/сут; μ_f – удельная скорость выедания и естественной смертности фитопланктона, 1/сут, которые задаются в виде функциональных зависимостей вида:

$$\sigma_f = V_f^{max} f_1(I) f_2(C_N, C_{PO4}) f_3(T), \quad (4.34)$$

$$f_1(I) = \frac{1}{\Delta z} \int_{z_i}^{z_{i+1}} f_z(I_z) dz = \frac{2.718 f_d}{\Delta z \alpha} \left[\exp(-R_{z_i}) - \exp(-R_{z_{i+1}}) \right], \quad (4.35)$$

$$R_0 = \frac{I_a}{I_{opt}}, \quad R_{z_i} = R_0 \exp(-\alpha z_i), \quad \Delta z = z_{i+1} - z_i$$

$$f_z(I_z) = \frac{I_z}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I_z}{I_{opt}}\right), \quad I_z = I_a \exp(-\alpha z).$$

$$f_2(C_N, C_{PO4}) = \min\left\{\frac{C_N}{\Pi_N + C_N}, \frac{C_{PO4}}{\Pi_{PO4} + C_{PO4}}\right\}, \quad (4.36)$$

где $C_N = C_{NH4} + C_{NO3}$.

$$f_3(T) = \begin{cases} e^{-\zeta_1(T-T_m)^2}, & \text{если } T \leq T_m \\ e^{-\zeta_2(T_m-T)^2}, & \text{если } T > T_m. \end{cases} \quad (4.37)$$

$$\varphi_f = \varphi_r e^{\zeta_\varphi(T-T_r)}, \quad (4.38)$$

$$\mu_f = \mu_r e^{\zeta_\mu(T-T_r)}. \quad (4.39)$$

Здесь V_f^{\max} – максимальная удельная скорость роста фитопланктона, 1/сут; I_a – средний за световой день поток ФАР, проникающий через поверхность моря, Вт/м²; I_{opt} – оптимальная для фотосинтеза облученность, Вт/м²; f_d – доля светового дня в сутках ($0 \leq f_d \leq 1$); I_z – облученность на глубине z , Вт/м²; α – интегральный коэффициент ослабления интенсивности ФАР с глубиной; Π_N, Π_{PO4} – константы полунасыщения скорости процесса утилизации фитопланктоном минеральных форм азота и фосфора, соответственно, мг/л; T – температура морской воды, °C; T_m – оптимальная для роста водорослей температура воды, °C; ζ_1, ζ_2 – коэффициенты, определяющие характер влияния температуры на рост водорослей в диапазонах выше и ниже T_m , 1/°C²; φ_r – удельная скорость метаболизма водорослей при температуре T_r , 1/сут; ζ_φ – коэффициент влияния температуры на скорость метаболизма, 1/°C; μ_r – удельная скорость выедания и гибели фитопланктона при температуре T_r , 1/сут; ζ_μ – коэффициент влияния температуры на скорость выедания и смертности водорослей, 1/°C.

Фосфор фосфатов, гР/м³.

$$\left. \frac{dC_{PO4}}{dt} \right|_{local} = (\varphi_f \alpha_P + \mu_f g_{PI} - \sigma_f) \beta_{P/C} V_f + K_{PO4} C_{DOP}, \quad (4.40)$$

где α_p – доля фосфатов в метаболических выделениях водорослей, ($0 \leq \alpha_p < 1$); g_{p1} – доля фосфатов, продуцируемая в результате выедания и смертности фитопланктона, ($0 \leq g_{p1} < 1$); $\beta_{P/C}$ – коэффициент, выражающий стехиометрическое соотношение между углеродом и фосфором в органическом веществе, гP/гC; K_{PO4} – удельная скорость минерализации растворенного органического фосфора, 1/сут, определяемая выражением:

$$K_{PO4} = K_{PO4}^{20} \left(\frac{B_f}{P_C + B_f} \right) \theta_{PC}^{(T-20)},$$

где K_{PO4}^{20} – удельная скорость минерализации растворенного органического фосфора при 20°C, 1/сут; θ_{PC} – температурный коэффициент; P_C – константа полунасыщения, определяющая лимитирующее влияние биомассы фитопланктона на регенерацию минеральных соединений фосфора и азота [64], гC/м³.

Азот аммония, гN/м³.

$$\left. \frac{dC_{NH4}}{dt} \right|_{local} = (\phi_f \alpha_N + \mu_f g_{N1} - \chi \sigma_f) \beta_{N/C} B_f + K_{NH4} C_{DON} - v_{12} C_{NH4}, \quad (4.41)$$

где α_N – доля аммонийного азота в метаболических выделениях водорослей; g_{N1} – доля аммонийного азота, продуцируемая в результате выедания и смертности фитопланктона; χ – доля минерального азота, потребляемая фитопланктоном в форме аммония, определяемая по формуле:

$$\chi = C_{NH4} \frac{C_{NO3}}{(P_N + C_{NH4})(P_N + C_{NO3})} + C_{NH4} \frac{P_N}{(C_{NH4} + C_{NO3})(P_N + C_{NO3})},$$

$\beta_{N/C}$ – стехиометрическое соотношение между углеродом и азотом в органическом веществе, гN/гC; K_{NH4} – удельная скорость минерализации органического азота, 1/сут, определяемая как

$K_{\text{NH4}} = K_{\text{NH4}}^{20} \left(\frac{B_f}{\Pi_C + B_f} \right) \theta_{\text{NC}}^{(T-20)}$, где K_{NH4}^{20} – удельная скорость

минерализации органического азота при температуре воды 20°C, 1/сут; θ_{NC} – температурный коэффициент; v_{12} – удельная скорость

нитрификации, 1/сут; описываемая выражением $v_{12} = v_{12}^{20} \varepsilon_{\text{ing}} \theta_{\text{NIT}}^{(T-20)}$, где v_{12}^{20} – удельная скорость нитрификации при температуре 20°C, 1/сут; θ_{NIT}

– температурный коэффициент; $\varepsilon_{\text{ing}} = \frac{C_{\text{O2}}}{\Pi_{\text{O2}} + C_{\text{O2}}}$ – множитель,

учитывающий лимитирующее влияние содержания в воде растворенного кислорода на процесс нитрификации, Π_{O2} – константа полунасыщения процесса в отношении наличной концентрации кислорода, гO₂/м³.

Азот нитратов, гN/м³.

$$\left. \frac{dC_{\text{NO3}}}{dt} \right|_{\text{local}} = (\chi - 1) \sigma_f \beta_{\text{N/C}} B_f + v_{12} C_{\text{NH4}} - v_{\text{DN}} C_{\text{NO3}}, \quad (4.42)$$

где v_{DN} – удельная скорость процесса денитрификации, 1/сут,

рассчитываемая по формуле $v_{\text{DN}} = v_{\text{DN}}^{20} \frac{\Pi_{\text{DN}}}{\Pi_{\text{DN}} + C_{\text{O2}}} \theta_{\text{DN}}^{(T-20)}$, v_{DN}^{20} –

удельная скорость денитрификации при температуре 20°C, 1/сут; θ_{DN} –

температурный коэффициент; Π_{DN} – константа, учитывающая влияние содержания растворенного в воде кислорода на развитие процесса денитрификации, гO₂/м³.

Растворенный органический фосфор, гP/м³.

$$\left. \frac{dC_{\text{DOP}}}{dt} \right|_{\text{local}} = (\varphi_f (1 - \alpha_p) + \mu_f g_{\text{P2}}) \beta_{\text{P/C}} B_f + \delta_p C_{\text{POP}} - K_{\text{PO4}} C_{\text{DOP}} \quad (4.43)$$

Здесь g_{P2} – доля растворенного органического фосфора, поступающая в результате выедания и смертности фитопланктона; δ_p – удельная скорость гидролиза лабильного взвешенного органического фосфора, зависящая от температуры воды: $\delta_p = \delta_p^{20} \theta_{\text{par}}^{(T-20)}$, где δ_p^{20} –

скорость гидролиза при температуре 20°C, θ_{par} – температурный коэффициент.

Лабильный взвешенный органический фосфор, гP/м³.

$$\left. \frac{dC_{\text{POP}}}{dt} \right|_{\text{local}} = \mu_f g_{\text{P3}} \beta_{\text{P/C}} B_f - \delta_{\text{P}} C_{\text{POP}}, \quad (4.44)$$

где g_{P3} – доля лабильного взвешенного фосфора, продуцируемая в результате выедания и смертности фитопланктона. Заметим, что $g_{\text{P1}} + g_{\text{P2}} + g_{\text{P3}} < 1$, поскольку в модели рассматривается только лабильная часть косного органического вещества.

Растворенный органический азот, гN/м³.

$$\left. \frac{dC_{\text{DON}}}{dt} \right|_{\text{local}} = (\varphi_f (1 - \alpha_N) + \mu_f g_{\text{N2}}) \beta_{\text{N/C}} B_f + \delta_N C_{\text{PON}} - K_{\text{NH4}} C_{\text{DON}}, \quad (4.45)$$

где g_{N2} – доля растворенного органического азота, поступающая в результате выедания и смертности фитопланктона; δ_N – удельная скорость гидролиза лабильного взвешенного органического азота, 1/сут, определяемая по аналогии с фосфорным циклом.

Лабильный взвешенный органический азот, гN/м³.

$$\left. \frac{dC_{\text{PON}}}{dt} \right|_{\text{local}} = \mu_f g_{\text{N3}} \beta_{\text{N/C}} B_f - \delta_N C_{\text{PON}}. \quad (4.46)$$

g_{N3} – доля лабильного взвешенного азота, продуцируемая в результате выедания и смертности фитопланктона.

Растворенная часть БПК (биохимического потребления кислорода), гO₂/м³, рассматриваемая в модели как кислородный эквивалент растворенного органического углерода.

$$\left. \frac{dB_{\text{org}}^{\text{dis}}}{dt} \right|_{\text{local}} = (\alpha_c \varphi_f + \mu_f g_{\text{C2}}) \beta_{\text{O2/C}} B_f + \delta_c B_{\text{org}}^{\text{det}} - K_{\text{BOD}} B_{\text{org}}^{\text{dis}}, \quad (4.47)$$

$$- \beta_{\text{O2/DN}} v_{\text{DN}} C_{\text{NO3}}$$

Здесь α_c – доля растворенного органического вещества в метаболических выделениях водорослей; g_{C2} – доля растворенного органического углерода, поступающая в результате выедания и смертности фитопланктона; $\delta_c = \delta_c^{20} \theta_c^{(T-20)}$ – удельная скорость растворения лабильного взвешенного органического углерода, 1/сут; δ_c^{20} – удельная скорость растворения при температуре 20°C; θ_c – температурный коэффициент процесса; K_{BOD} – удельная скорость биохимического окисления органического вещества, 1/сут, рассчитываемая как $K_{BOD} = K_{BOD}^{20} \theta_{BOD}^{(T-20)} \epsilon_{ing}$, где K_{BOD}^{20} – удельная скорость биохимического окисления органического вещества при $T=20$ °C, 1/сут; θ_{BOD} – температурный коэффициент; $\beta_{O2/DN}$ – кислородный эквивалент использования органического углерода в ходе реакции денитрификации, гO₂/гN.

Детритная часть БПК, гO₂/м³.

$$\left. \frac{dB_{org}^{det}}{dt} \right|_{local} = \mu_f g_{C3} \beta_{O2/C} B_f - \delta_c B_{org}^{det}, \quad (4.48)$$

где g_{C3} – доля лабильной части взвешенного органического углерода, поступающая в результате выедания и смертности фитопланктона.

Растворенный кислород, гO₂/м³.

$$\left. \frac{dC_{O2}}{dt} \right|_{local} = [\sigma_f (1.3 - 0.3\chi) - (1 - \alpha_c) \varphi_f] \beta_{O2/C} B_f - K_{BOD} B_{org}^{dis} - v_{12} C_{NH4} \beta_{O2/NT}, \quad (4.49)$$

где $\beta_{O2/NT}$ – кислородный эквивалент процесса нитрификации, гO₂/гN.

БПК₅, гO₂/м³. Эта формальная по сути величина включена в модель, поскольку является одним из самых распространенных гидрохимических показателей качества вод. Для ее оценки используется диагностическая формула:

$$\begin{aligned} \text{BOD}_5 = & B_{\text{org}}^{\text{dis}} \left(1 - e^{-5K_{\text{BOD}}^{\text{lab}}} \right) + \beta_{\text{O}_2/\text{NT}} C_{\text{NH}_4} \left(1 - e^{-5v_{12}^{\text{lab}}} \right) \\ & + \beta_{\text{O}_2/\text{C}} B_f \left(1 - e^{-5\phi_f^{\text{lab}}} \right), \end{aligned} \quad (4.50)$$

где BOD_5 – величина БПК₅; $K_{\text{BOD}}^{\text{lab}}$, v_{12}^{lab} , ϕ_f^{lab} – удельные скорости процессов биохимического окисления органического вещества, нитрификации и дыхания фитопланктона в лабораторных условиях инкубации пробы.

В блоке эвтрофикации рассчитываются также потоки кислорода на верхней и нижней границах водной колонки и массообмен биогенными элементами между водой и донными отложениями.

Газообмен кислородом с атмосферой рассчитывается на основе зависимости [65]:

$$Q_{\text{O}_2}^{\text{atm}} = \zeta_{e,i} n_v n_T (C_{\text{O}_2}^{\text{S}} - C_{\text{O}_2}), \quad (4.51)$$

а поглощение кислорода донными осадками – с помощью функциональной зависимости [66]:

$$Q_{\text{O}_2}^{\text{bot}} = \frac{C_{\text{O}_2}^{\text{b}}}{\Pi_{\text{O}_2} + C_{\text{O}_2}^{\text{b}}} Q_{\text{O}_2}^{\text{Tb}} e^{\zeta_o(T-T_b)}, \quad (4.52)$$

где $Q_{\text{O}_2}^{\text{atm}}$ – поступление (инвазия) или выделение (эвазия) кислорода, мг/м²·ч, $\zeta_{e,i}$ – коэффициент инвазии (эвазии), л/м²·ч; n_T – температурный коэффициент; n_v – интегральный ветровой коэффициент:

$$n_v = \begin{cases} 1.0 + 0.27W^2, & \text{для } W \leq 8 \text{ м/с} \\ -7.4 + 0.4W^2, & \text{для } W > 8 \text{ м/с;} \end{cases}$$

W – скорость ветра, м/с; $C_{\text{O}_2}^{\text{S}}$ – насыщающая (при данной температуре и солености воды) концентрация кислорода, мг/л; $Q_{\text{O}_2}^{\text{Tb}}$ – поток поглощения кислорода донными осадками, гО₂/м²сут, при температуре придонных вод

$T_b, ^\circ\text{C}$; $C_{\text{O}_2}^b$ – содержание кислорода в воде придонного слоя, $\text{гO}_2/\text{м}^3$; ζ_0 – коэффициент, описывающий влияние температуры на поглощение кислорода донными осадками, $1/^\circ\text{C}$.

Поток нитратов в системе вода – донные отложения определяется соотношением их концентраций в воде и донных отложениях, скоростью массообмена через границу раздела и интенсивностью процесса денитрификации в донных отложениях [66]:

$$Q_{\text{NO}_3}^{\text{bot}} = k_{\text{sw}} \left(C_{\text{NO}_3}^{\text{bot}} - C_{\text{NO}_3}^b \right) e^{\zeta_{\text{dn}} (T - T_{\text{rNO}_3})}. \quad (4.53)$$

Здесь k_{sw} – скорость переноса массы через границу вода-донные отложения, $\text{м}/\text{сут}$; $C_{\text{NO}_3}^b$ – концентрация нитратов в поровых водах донных отложений, $\text{гN}/\text{м}^3$; $C_{\text{NO}_3}^{\text{bot}}$ – концентрация нитратов в водах придонного слоя, $\text{гN}/\text{м}^3$; ζ_{dn} – коэффициент, описывающий влияние температуры на скорость денитрификации, $1/^\circ\text{C}$; T_{rNO_3} – температура, для которой определяется поток нитратов.

В модели учитывается влияние температуры на задаваемые пользователем потоки аммонийного азота и фосфатов в системе вода-донные отложения:

$$Q_{\text{C}_i}^{\text{bot}} = Q_{\text{C}_i}^{\text{br}} e^{\zeta_{\text{ci}} (T - T_{\text{br}})}, \quad (4.54)$$

где $Q_{\text{C}_i}^{\text{bot}}$ – донный поток субстанции C_i , $\text{г}/\text{м}^2\text{сут}$, при температуре T ; $Q_{\text{C}_i}^{\text{br}}$ – донный поток субстанции C_i , $\text{г}/\text{м}^2\text{сут}$, определенный при температуре T_{br} ; ζ_{ci} – температурный коэффициент, $1/^\circ\text{C}$.

Зависимость интенсивности массообмена с донными отложениями от температуры воды обусловлена тем, что в умеренных широтах при прогреве вод придонного слоя в весенне-летний период возрастают скорости минерализации аккумулированного в донных отложениях органического вещества, что приводит к интенсификации потоков минеральных соединений биогенных элементов из донных отложений в толщу воды и потока поглощения кислорода донными отложениями.

Модель адаптирована к условиям Днепровско-Бугского приустьевого участка СЗЧМ, который включает в себя Одесский район [60, 63, 67]. Блок эвтрофикации калибровался по данным многолетнего экологического мониторинга, проведенного в исследуемой акватории Оф ИнБИОМ НАН

Украины [60, 63, 67]. Параметры и коэффициенты модели, принятые в результате ее калибровки, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения параметров и коэффициентов блока эвтрофикации модели качества вод СЗЧМ, принятые в результате калибровки

| Параметр | Значение | Ед.изм. | Параметр | Значение | Ед.изм. |
|-----------------|----------------|-------------------|--------------------|------------|-------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| V_f^{\max} | 2.25 (2.0)* | 1/сут | g_{N1} | 0. | – |
| ζ_1 | 0.008 (0.004)* | 1/°C ² | g_{N2} | 0.65 | – |
| ζ_2 | 0.010 (0.006)* | 1/°C ² | g_{N3} | 0.3 | – |
| T_m | 25. (10.)* | °C | v_{NO3}^{20} | 0.1 | 1/сут |
| Π_N | 0.050 | гN/м ³ | Π_{DN} | 0.09 | гO ₂ /м ³ |
| Π_{PO4} | 0.005 | гP/м ³ | θ_{DN} | 1.09 | – |
| φ_r | 0.1 (0.08)* | 1/сут | δ_N^{20} | 0.03 | 1/сут |
| T_r | 25. | °C | g_{C2} | 0.6 | – |
| ζ_φ | 0.069 | 1/°C | g_{C3} | 0.3 | – |
| μ_r | 0.10 (0.22)* | 1/сут | δ_c^{20} | 0.03 | 1/сут |
| ζ_μ | 0.069 | 1/°C | θ_c | 1.1 | – |
| w_{gf} | 0.1 | м/сут | K_{BOD}^{20} | 0.16 | 1/сут |
| $\beta_{P/C}$ | 0.022 | гP/гC | θ_{BOD} | 1.06 | – |
| α_p | 0. | – | $\beta_{O2/DN}$ | 2.86 | гO ₂ /гN |
| K_{PO4}^{20} | 0.14 | 1/сут | $\beta_{O2/C}$ | 2.67 | гO ₂ /гC |
| θ_{PC} | 1.1 | – | $\beta_{O2/NT}$ | 4.57 | гO ₂ /гN |
| Π_C | 0.6 | гC/м ³ | ζ_e, ζ_i | 22.0, 11.5 | л/м ² ч |
| g_{P1} | 0. | – | Q_{O2}^{Tb} | -3.5 | гO ₂ /м ² сут |
| g_{P2} | 0.5 | – | ζ_o | 0.07 | 1/°C |
| g_{P3} | 0.3 | – | T_b | 8.0 | °C |
| δ_P^{20} | 0.03 | 1/сут | Q_{NH4}^{br} | 0.05 | гN/м ² сут |
| θ_{par} | 1.1 | – | Q_{PO4}^{br} | 0.005 | гP/м ² сут |
| $\beta_{N/C}$ | 0.205 | гN/гC | ζ_{ci} | 0.07 | 1/°C |
| α_N | 0. | – | T_{br} | 20. | °C |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------|------|---------------------------------|--------------|------|-------|
| $K_{NH_4}^{20}$ | 0.06 | 1/сут | k_{sw} | 0.2 | м/сут |
| θ_{NC} | 1.08 | – | ζ_{dn} | 0.07 | 1/°C |
| v_{12}^{20} | 0.04 | 1/сут | T_{rNO_3} | 20.0 | °C |
| θ_{NIT} | 1.16 | – | w_{gPOP} | 0.5 | м/сут |
| Π_{NIT} | 0.5 | гN/м ³ | w_{gPON} | 0.5 | м/сут |
| Π_{O_2} | 1.0 | гO ₂ /м ³ | $w_{g det}$ | 0.5 | м/сут |

*– значение параметра в период с марта по май

4.2 Основные черты циркуляции вод Одесского района и их влияние на перенос загрязняющих веществ от СБО

Для изучения особенностей циркуляции вод в Одесском районе СЗЧМ использовалась численная гидротермодинамическая модель [58, 60], описание которой представлено в предыдущем подразделе. Расчеты проводились для ветров восьми основных румбов со скоростью 7 м/с. Расчетная область исследуемой акватории покрывалась сеткой 61×72 узла с шагом 500 м (рис. 4.2). Использовались 10 расчетных уровней по вертикали. Задавалось начальное вертикальное распределение температуры и солёности воды, характерное для летнего периода (рис. 4.3). В горизонтальной плоскости начальное распределение температуры и солёности воды полагалось однородным. Расчет велся на 5 суток модельного времени при неизменных ветрах с учетом теплообмена с атмосферой.

Результаты расчетов полей векторов течений в исследуемом районе представлены на рис. 4.4 – 4.7 [68]. Видно, что при ветрах СВ, В, ЮЗ, З направлений на мелководье и свале глубин прибрежной зоны формируется однонаправленный вдольбереговой поток (рис. 4.4, 4.6), направленный по часовой стрелке при СЗ, З ветрах и против – при СВ, В ветрах. Средняя повторяемость этих ветров в течение летнего периода года по данным ГМС Одесса-порт составляет 31 % (см. главу 1). При С и Ю ветрах вдольбереговой поток разрывается в районе мелководья Одесского залива, где течения существенно ослабевают и образуют слабо выраженные замкнутые циркуляционные структуры. При С, СЗ, Ю и ЮВ ветрах вдоль западной границы исследуемой акватории у побережья г. Одессы между

мысами Ланжерон и Большой Фонтан формируется узкое прибрежное противотечение, направленное противоположно основному баротропному потоку, расположенному мористее. При общем доминировании дрейфовой составляющей, пространственная изменчивость векторов суммарных течений в поверхностном слое определяется значительным влиянием баротропного потока на мелководье и плотностных течений, возникающих вследствие сгонно-нагонных явлений. Характер придонной циркуляции вод близок к баротропному.

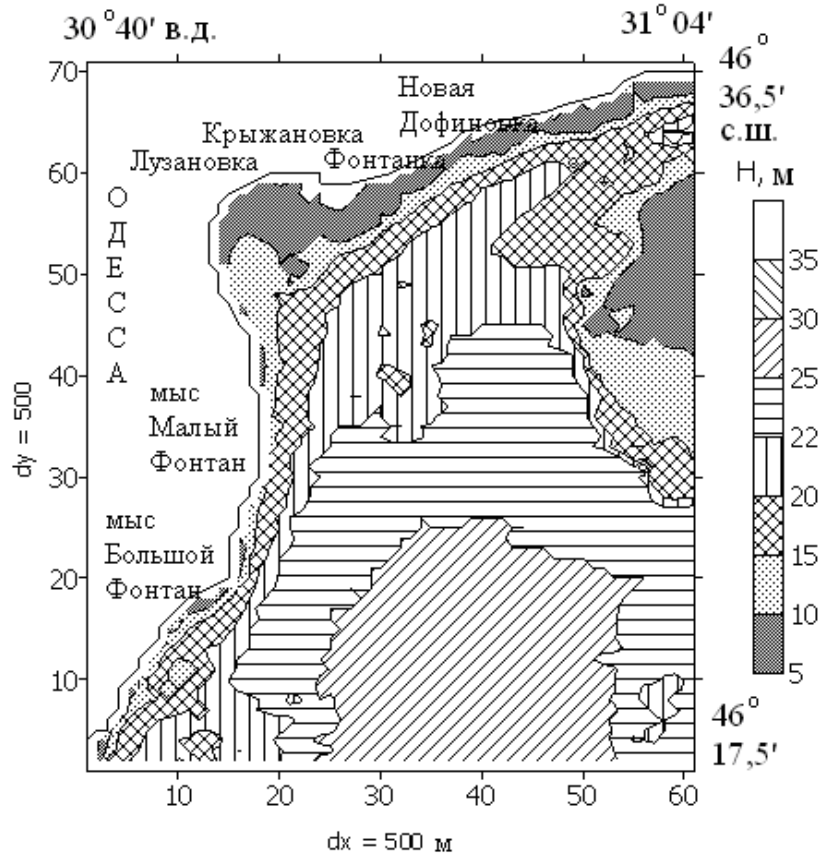


Рис. 4.2 – Расчетная область и батиметрическая карта (глубины в м) Одесского района СЗЧМ. На осях координат указаны номера узлов расчетной сетки.

Поскольку выпуски станций СБО «Северная» и «Южная» являются наиболее мощными источниками загрязнения, то несомненный интерес представляет анализ влияния особенностей циркуляции вод в прибрежной зоне Одесского района на характер распространения загрязняющих веществ, поступающих от этих источников. С этой целью был выполнен расчет уровня и масштаба загрязнения прибрежной зоны Одесского района при ветрах различных направлений в результате функционирования СБО «Северная» и «Южная». Моделировалось распространение условной пассивной, консервативной примеси нейтральной плавучести,

концентрация которой в сбросных водах СБО полагалась равной 1000 условным единицам (у.е.) в 1 м³ сточных вод. Расходы сточных вод для СБО задавались равными фактическим (см. главу 2). Фоновая концентрация примеси в водах исследуемой акватории принималась равной нулю.

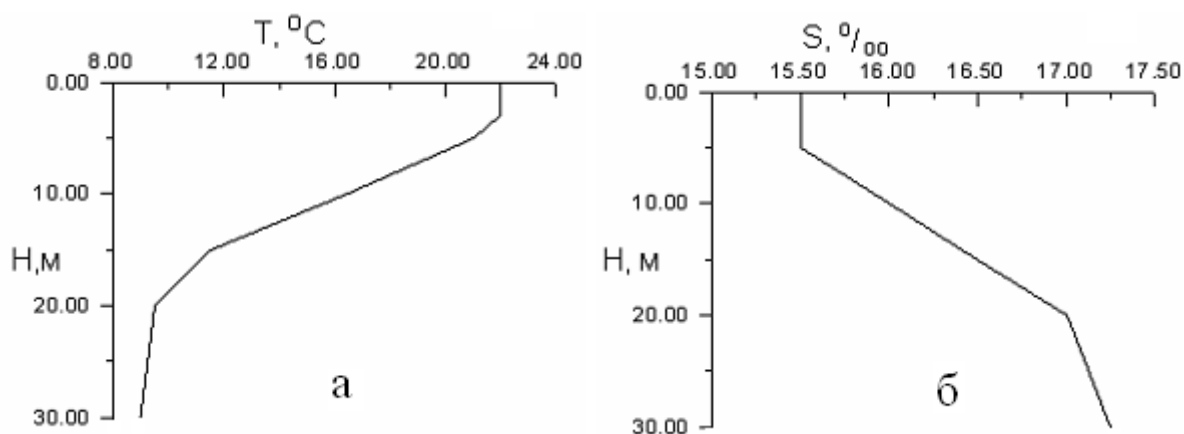


Рис. 4.3 – Вертикальное распределение температуры (а) и солености (б) воды, характерное для летнего периода.

Из рис. 4.8 следует, что загрязняющие вещества, поступающие со сточными водами СБО «Северная», будут распространяться вдоль северного побережья исследуемого района при Ю, ЮЗ, З и СЗ ветрах (суммарная повторяемость в летний период 57 %), ухудшая качество вод в районах пляжей Лузановка, Крыжановка, Фонтанка, Новая Дофиновка. Наиболее высокий уровень загрязнения вод (более 10 усл. ед.) формируется в районах пляжей Лузановка и Крыжановка при Ю и ЮЗ ветрах. При С, СВ, В, ЮВ ветрах (суммарная повторяемость в летний период 40 %) загрязняющие вещества, поступающие со сточными водами СБО «Северная», ухудшают качество прибрежных вод вдоль западной границы Одесского района в пределах рекреационного побережья г. Одессы. Наиболее высокий уровень загрязнения морских вод на участке побережья от м.Ланжерон до м. Малый Фонтан формируется при СВ и В ветрах. Такая ситуация может наблюдаться летом в 11 % случаев.

Загрязняющие вещества от заглубленного выпуска СБО «Южная» будут переноситься на север вдоль западного рекреационного побережья исследуемого района при Ю, ЮЗ и З ветрах, которые наблюдаются в 32 % случаев в летний период (рис. 4.9). Наиболее негативное влияние на качество вод рекреационного побережья г.Одессы СБО «Южная» оказывает при З ветрах (повторяемость 25 %). При ЮЗ и З ветрах сброс сточных вод СБО «Южная» может способствовать повышению уровня загрязнения вод в районе пляжей Лузановка и Крыжановка.

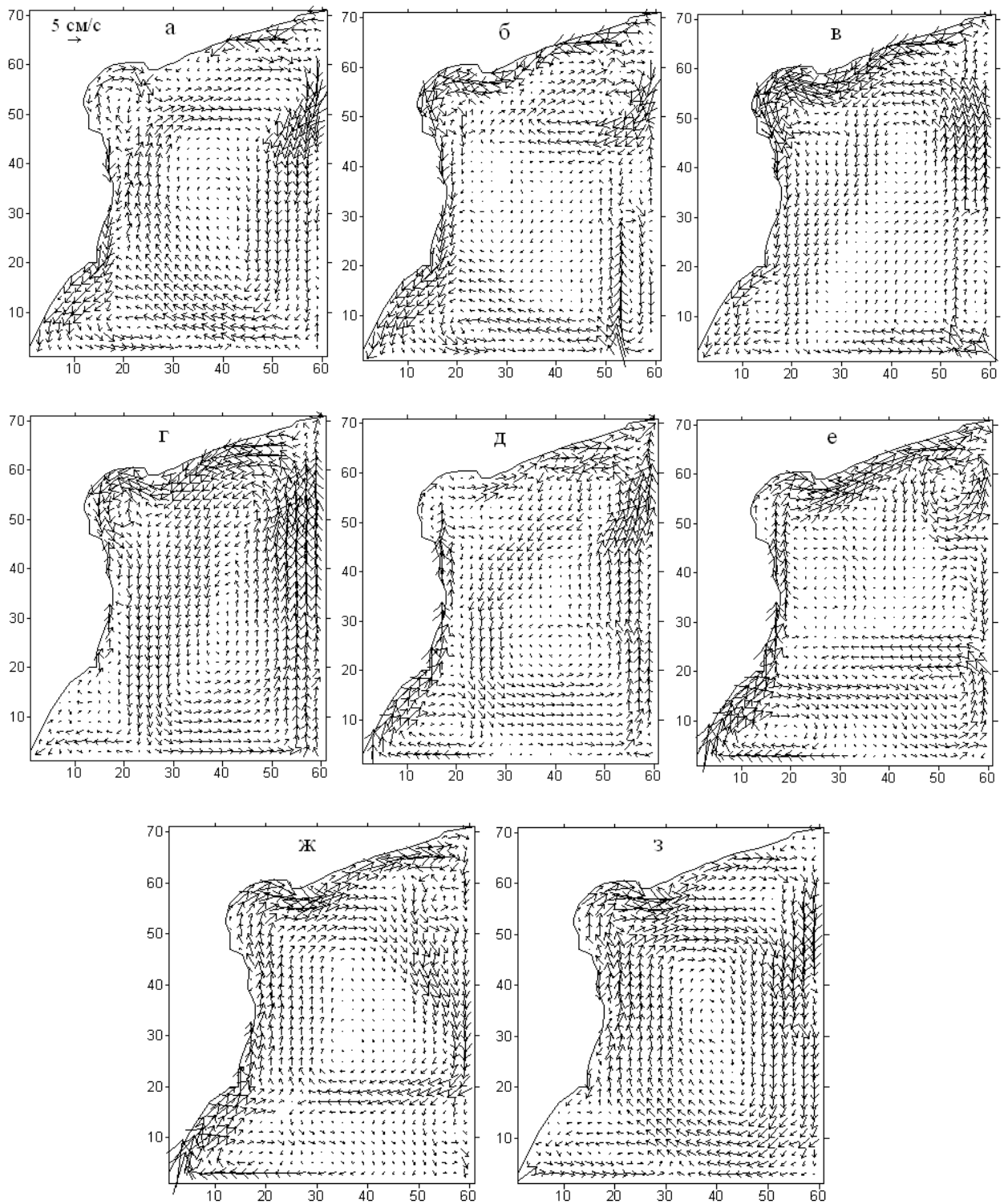


Рис. 4.4 – Поле векторов баротропных течений, см/с, в Одесском районе СЗЧМ при ветрах различных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный; д) южный; е) юго-западный; ж) западный; з) северо-западный.

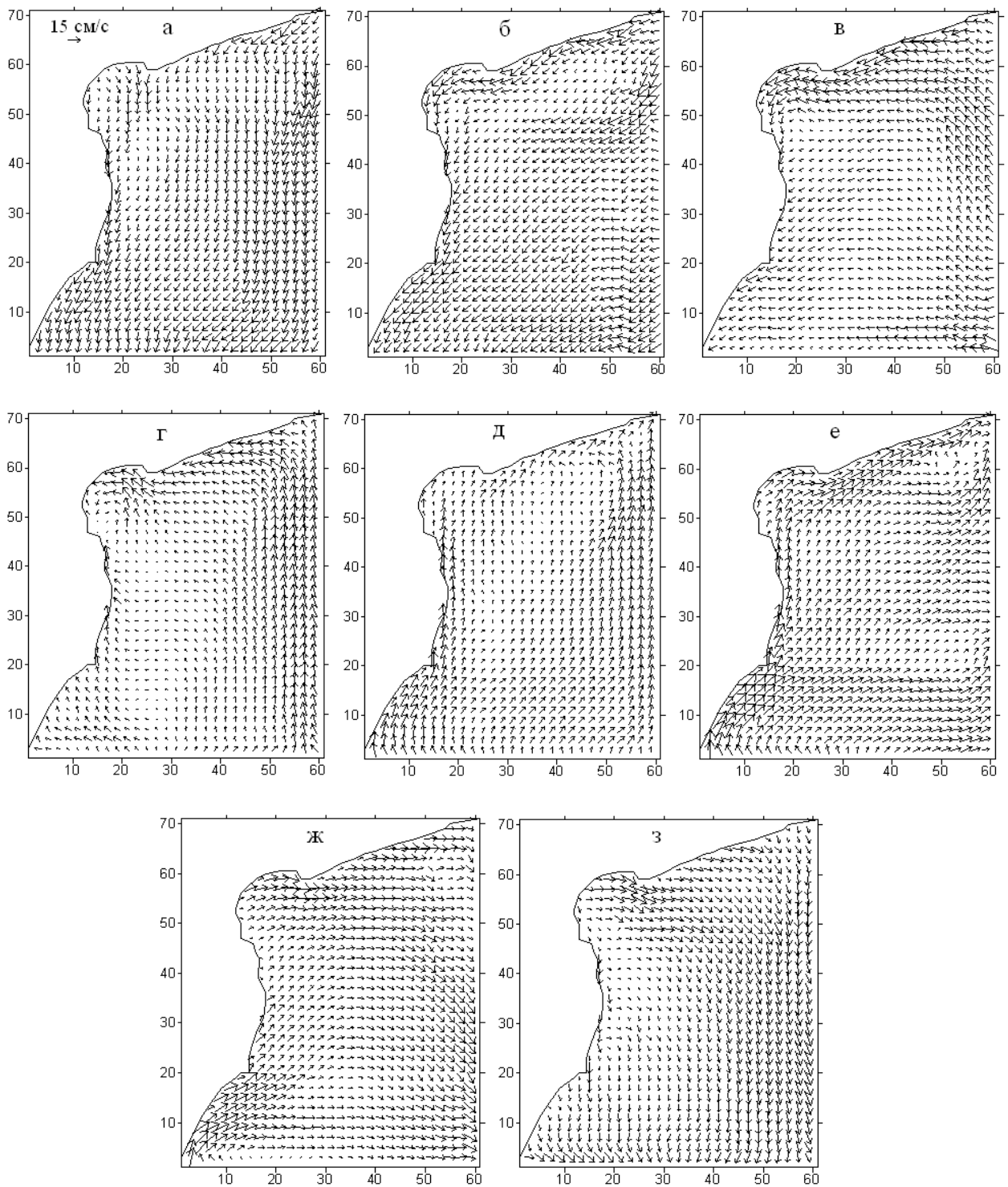


Рис. 4.5 – Поле векторов поверхностных течений, см/с, в Одесском районе СЗЧМ при ветрах различных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный; д) южный; е) юго-западный; ж) западный; з) северо-западный.

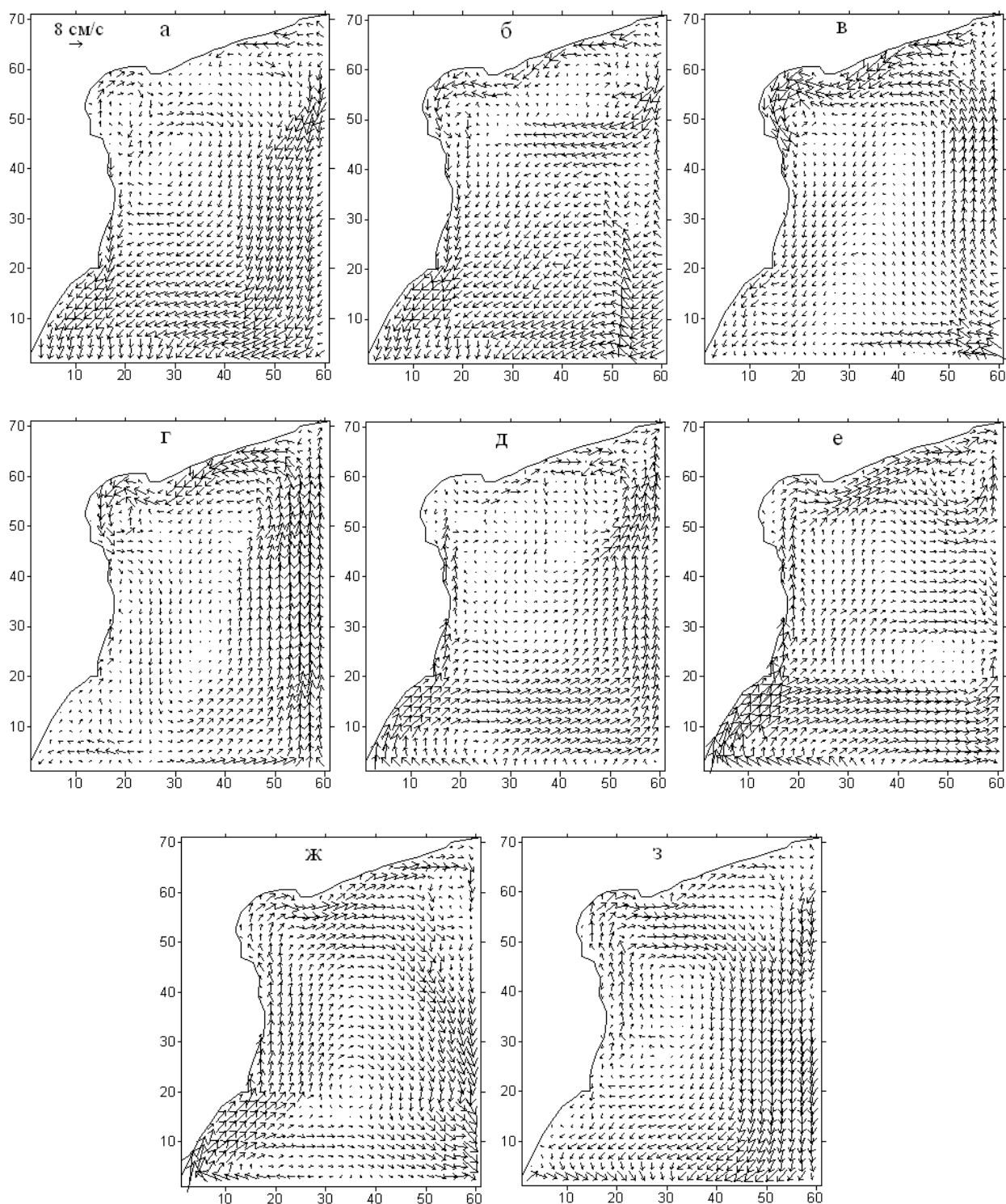


Рис. 4.6 – Поле векторов течений на глубине 4 м , см/с, в Одесском районе СЗЧМ при ветрах различных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный; д) южный; е) юго-западный; ж) западный; з) северо-западный.

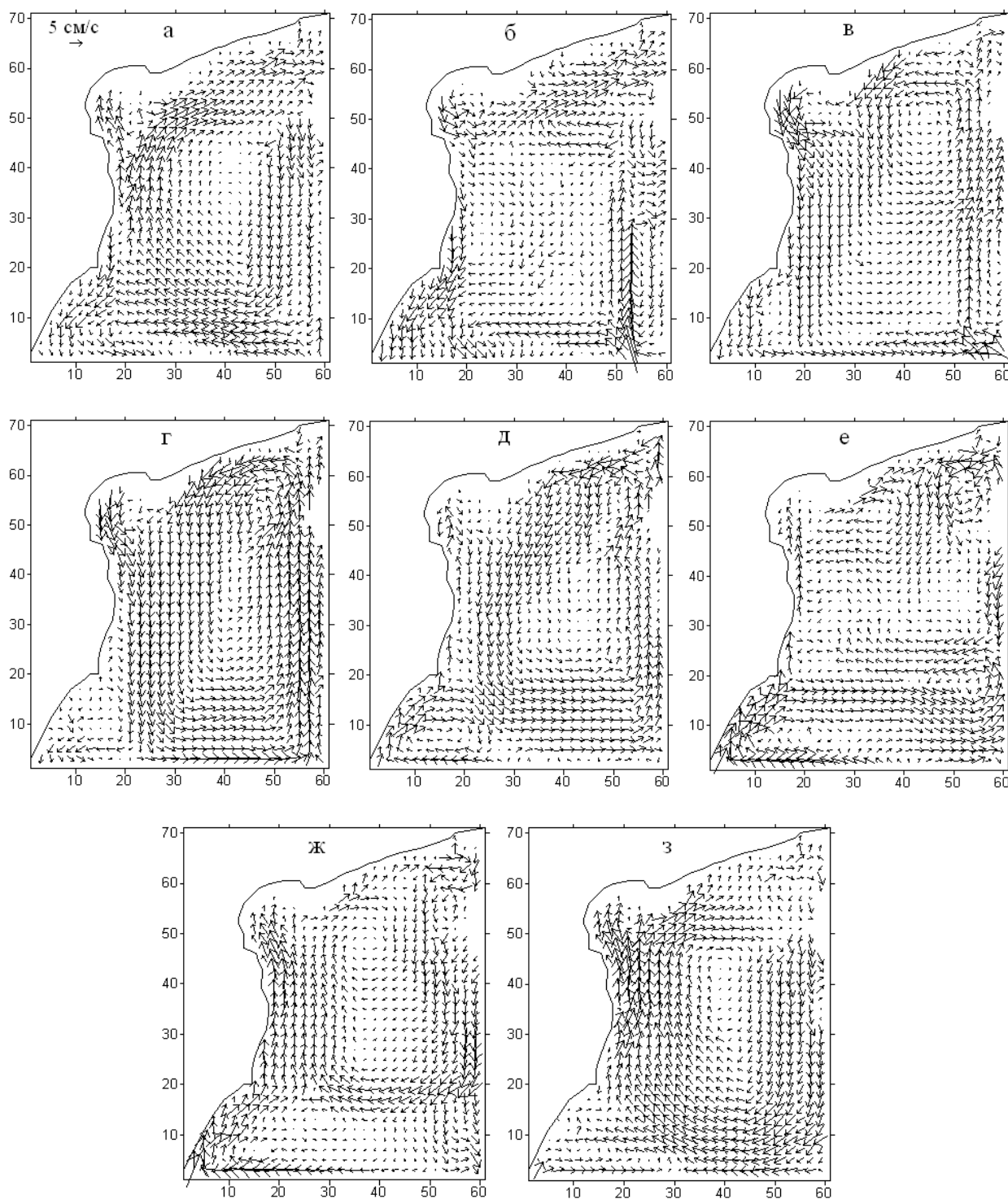


Рис. 4.7 – Поле векторов течений на глубине 9 м , см/с, в Одесском районе СЗЧМ при ветрах различных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный; д) южный; е) юго-западный; ж) западный; з) северо-западный.

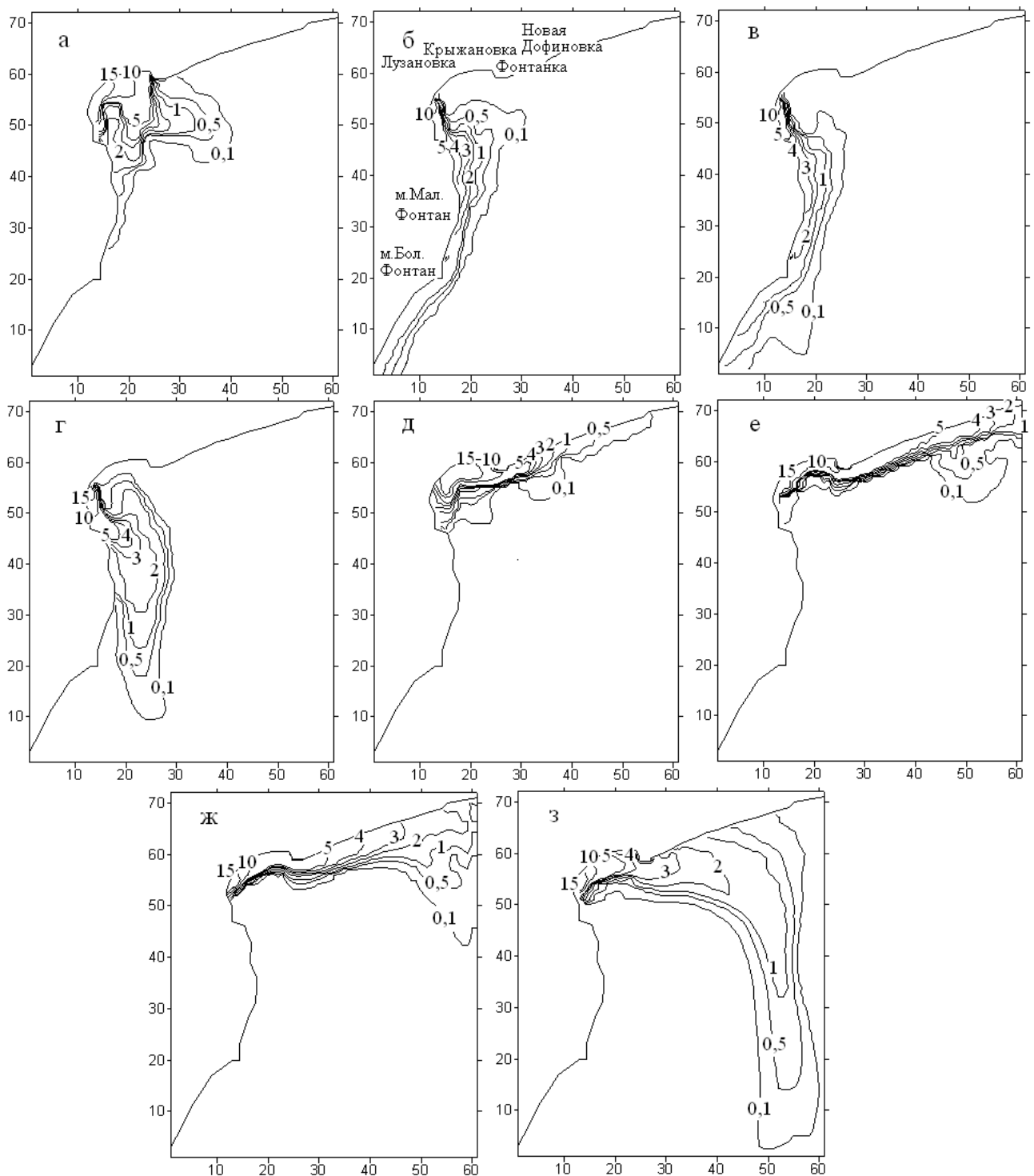


Рис. 4.8 – Концентрация консервативной примеси нейтральной плавучести (загрязняющего вещества) в поверхностном слое при функционировании СБО «Северная» (*современный вариант*) при ветрах разных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный; д) южный; е) юго-западный; ж) западный; з) северо-западный. На осях указаны номера узлов расчетной сетки (горизонтальный пространственный шаг 500 м).

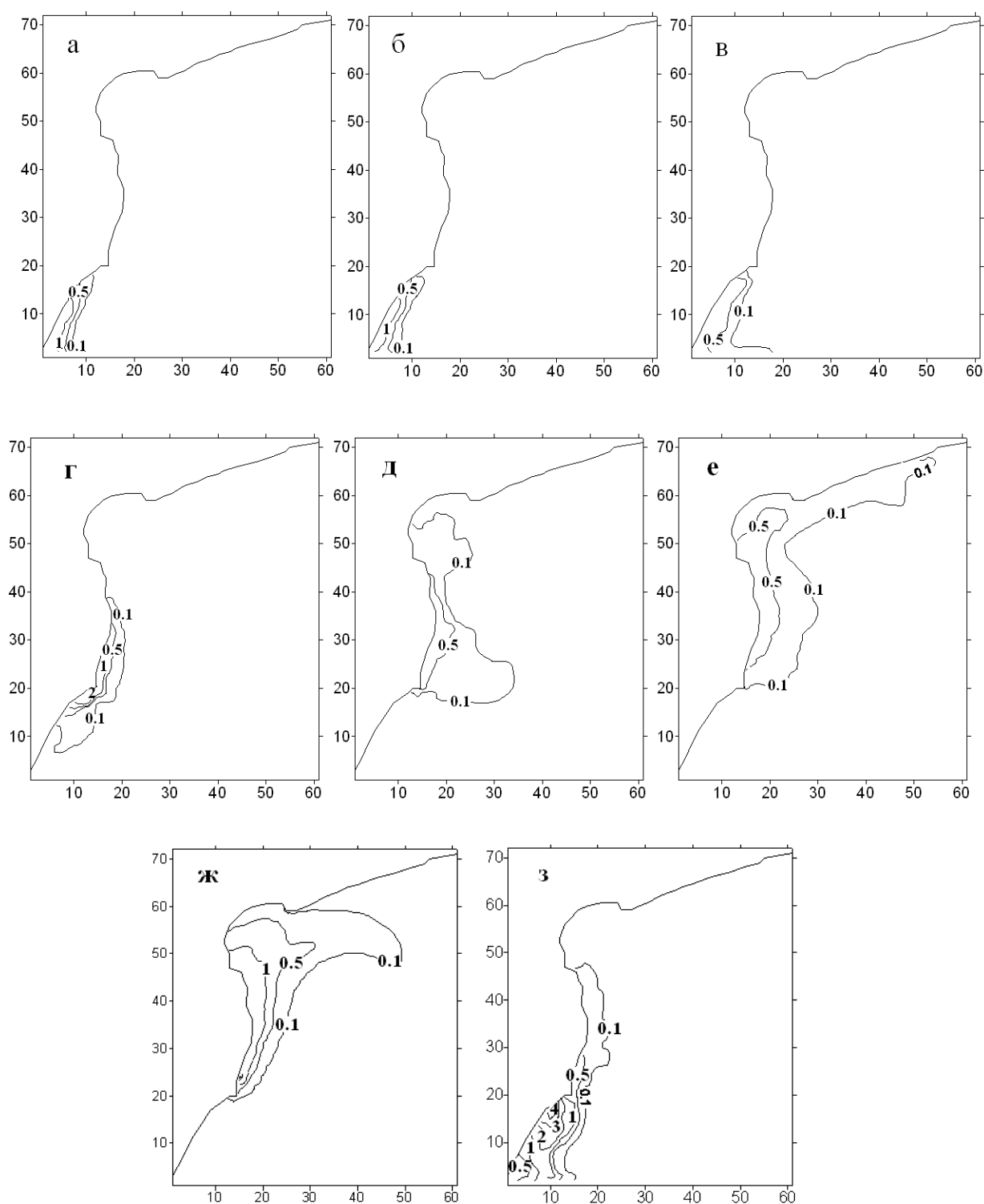


Рис. 4.9 – Концентрация консервативной примеси нейтральной плавучести в поверхностном слое при функционировании СБО «Южная» при ветрах разных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный; д) южный; е) юго-западный; ж) западный; з) северо-западный.

Характерная особенность изменчивости гидрологической структуры вод исследуемого района в летний период года заключается в систематическом развитии прибрежного ветрового апвеллинга, который сопровождается подъемом к поверхности холодных придонных вод в прибрежной зоне моря (см. главу 1). Такой эффект хорошо прослеживается в результатах модельных расчетов распределения температуры воды поверхностного слоя при ветрах различных направлений, представленных на рис. 4.10.б,в.

Развитие прибрежного апвеллинга способствует увеличению влияния глубоководного выпуска сточных вод СБО «Южная» на уровень загрязнения поверхностных вод прилегающей прибрежной рекреационной зоны г. Одесса (западное побережье). В этом случае сезонный термоклин выклинивается к поверхности и его изолирующее влияние на распространение загрязняющих веществ по вертикали уменьшается. Этот эффект проявляется при ЮЗ и З ветрах.

Оценки уровня и масштабов загрязнения вод Одесского района СЗЧМ при совместном функционировании СБО «Северная» и «Южная» в летний период года приведены на рис. 4.11. Видно, что наиболее высокий уровень загрязнения морских вод у северного рекреационного побережья исследуемого района формируется при Ю, ЮЗ, З и СЗ ветрах (суммарная повторяемость 60 % в летний период). Качество вод в прибрежной зоне западного рекреационного побережья может существенно ухудшаться при СВ, В, ЮВ и З ветрах (суммарная повторяемость 51 % в летний период).

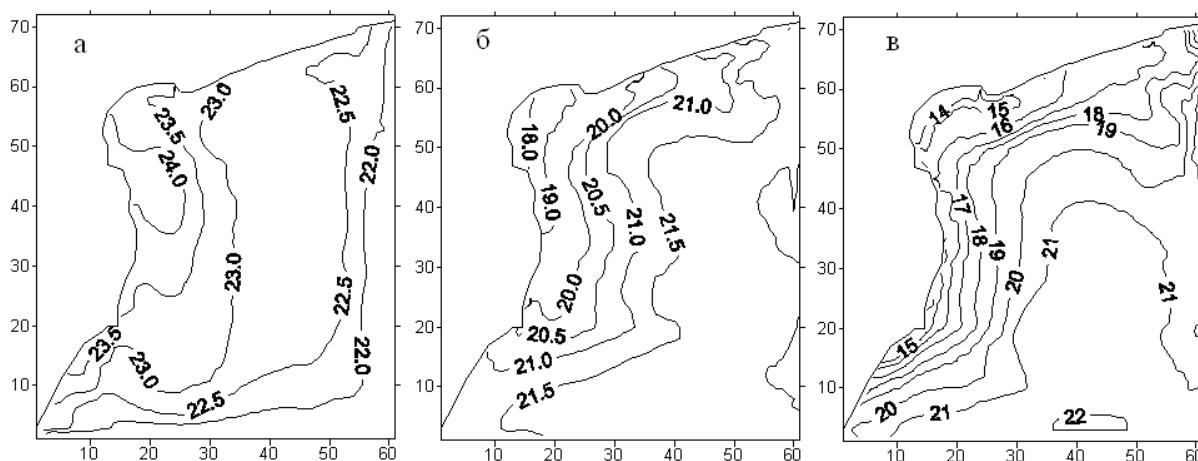


Рис. 4.10 – Распределение температуры морской воды (°C) в поверхностном слое для юго-восточного (а), юго-западного (б) и западного (в) ветров со скоростью 7 м/с.

В связи с планируемым строительством удаленного на 4 км от берегов выпуска сточных вод СБО «Северная», несомненный интерес представляют оценки возможного изменения уровня и масштабов загрязнения вод акватории при введении его в эксплуатацию.

Рассчитанные по модели поля концентраций загрязняющих веществ в поверхностном слое акватории Одесского района для проектируемого варианта сброса, а также оценки изменения концентраций, которые произойдут при удалении выпуска сточных вод СБО «Северная» на 4 км от берега, по сравнению с современным вариантом сброса, представлены на рис. 4.12 – 4.17.

Из рис. 4.14 – 4.15 следует, что при реализации проекта, концентрации загрязняющих веществ в прибрежной зоне северного побережья Одесского района уменьшатся при ветрах большинства направлений, за исключением северного. Особенно значительное уменьшение уровня загрязнения вод следует ожидать вдоль северного побережья Одесского залива. Возможно незначительное увеличение загрязнения прибрежных вод в районе Новой Дофиновки при северо-западном ветре.

Вдоль рекреационного западного побережья Одесского района, на участке между мысами Ланжерон и Малый фонтан, уровень загрязнения прибрежных вод может возрасти при С и Ю ветрах, суммарная повторяемость которых в летний период составляет 26,5 %.

При расчете изменений концентрации загрязняющих в относительных единицах использовалась формула вида:

$$\eta_{i,j} = \left(C_{i,j}^M / C_{i,j}^П - 1 \right) \cdot 100\% , \quad (4.55)$$

где $\eta_{i,j}$ – изменение (в %) концентрации пассивной, консервативной примеси нейтральной плавучести – условного аналога загрязняющего вещества, в каждой расчетной точке акватории при введении в эксплуатацию удаленного морского выпуска сточных вод СБО «Северная» в сравнении существующим прибрежным вариантом сброса;

$C_{i,j}^M$ – концентрация моделируемого загрязняющего вещества в узле (i, j) расчетной сетки при удаленном морском выпуске сточных вод;

$C_{i,j}^П$ – концентрация моделируемого загрязняющего вещества в том же узле сетки при существующем прибрежном варианте сброса.

При анализе оценок изменения концентраций загрязняющих веществ, получаемых с помощью формулы (4.55), приведенных на рис. 4.16-4.17, следует иметь ввиду, что рассчитанные значения η в разных

шкалах отражают относительное изменение концентрации примеси в области положительных (увеличение концентрации) и отрицательных (уменьшение концентрации) значений η . В области положительных значений $\eta=100\%$ соответствуют увеличению концентрации примеси в 2 раза, $\eta=200\%$ – в 3 раза и т.д. В области отрицательных значений $\eta=-100\%$ соответствует уменьшению концентрации примеси до нуля, $\eta=-25\%$ – уменьшению концентрации примеси в 1,3 раза, $\eta=-50\%$ – в 2 раза, $\eta=-75\%$ – в 4 раза, $\eta=-90\%$ – в 10 раз.

Из анализа рис. 4.16–4.17, с учетом изложенных выше комментариев, следует, что в прибрежной зоне западного рекреационного побережья Одесского района, в случае введения в эксплуатацию удаленного морского выпуска сточных вод СБО «Северная», возможно увеличение уровня загрязнения прибрежных вод на 25-100%, по сравнению с современным вариантом сброса, при С и Ю ветрах. При ветрах с восточной составляющей (суммарная повторяемость 26,4%), уровень загрязнения прибрежных вод на участке между мысами Ланжерон и Малый Фонтан уменьшится в 2-4, а возможно и более раз. При ветрах с западной составляющей (повторяемость 47,1%) концентрация загрязняющих веществ не изменится.

У северного побережья Одесского района уровень загрязнения прибрежных вод существенно уменьшится при Ю, ЮЗ и З ветрах (суммарная повторяемость 42%). Однако при С ветре возможно увеличение концентрации загрязняющих веществ восточнее м.Северный более чем в 2 раза. При ветрах с восточной составляющей качество прибрежных вод существенно не изменится, т.к. концентрации загрязняющих веществ у северного побережья малы.

В заключение заметим, что полученные оценки уровня и масштабов загрязнения акватории Одесского района СЗЧМ сбросными водами СБО «Северная» и «Южная» представляют собой принятые при экологических расчетах оценки «сверху», т.е. это максимально возможные концентрации загрязняющих веществ при заданных условиях. В действительности многие виды загрязняющих веществ не являются консервативными и, помимо гидродинамического разбавления, их концентрации в воде убывают в воде за счет процессов химико-биологической трансформации и деструкции.

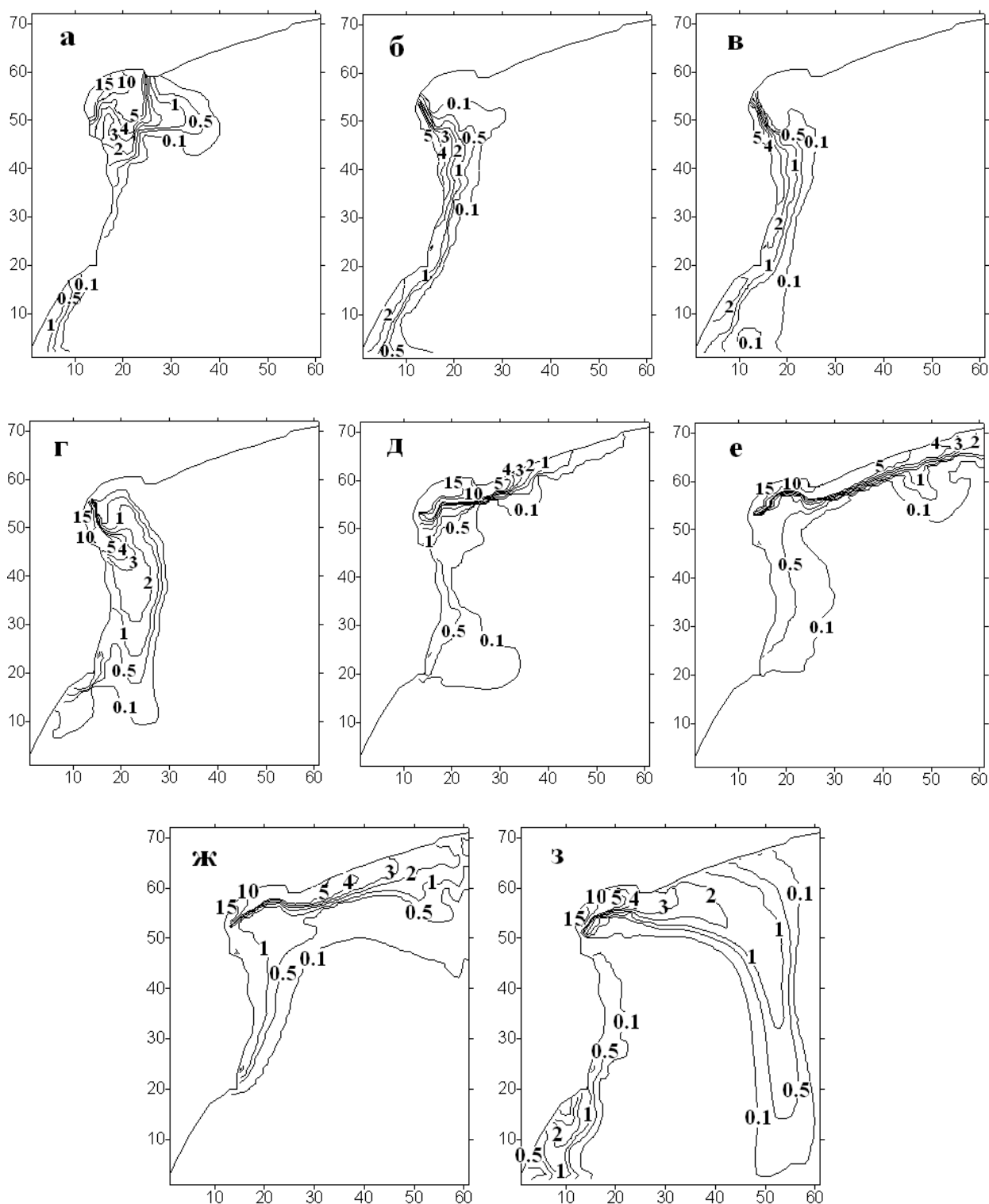


Рис. 4.11 – Концентрация консервативной примеси нейтральной плавучести в поверхностном слое при совместном функционировании СБО «Северная» (*современный вариант сброса*) и «Южная» при ветрах разных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный; д) южный; е) юго-западный; ж) западный; з) северо-западный.



Рис. 4.12 – Концентрация консервативной примеси нейтральной плавучести (загрязняющего вещества) в поверхностном слое при функционировании СБО «Северная» (*проектируемый вариант*) при ветрах разных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный; д) южный; е) юго-западный; ж) западный; з) северо-западный.

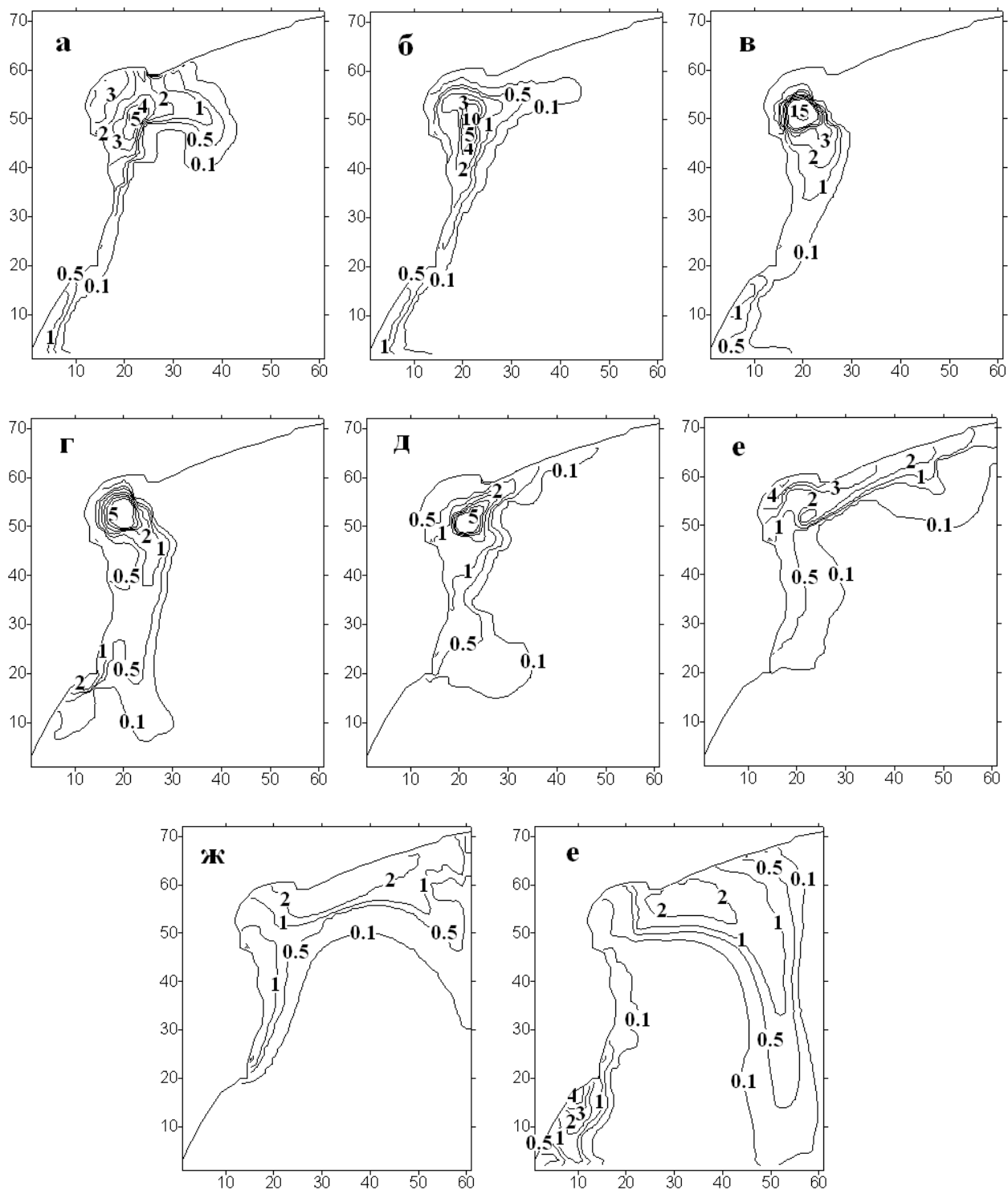


Рис. 4.13 – Концентрация консервативной примеси нейтральной плавучести в поверхностном слое при совместном функционировании СБО «Северная» (*проектируемый вариант сброса*) и «Южная» при ветрах разных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный; д) южный; е) юго-западный; ж) западный; з) северо-западный.

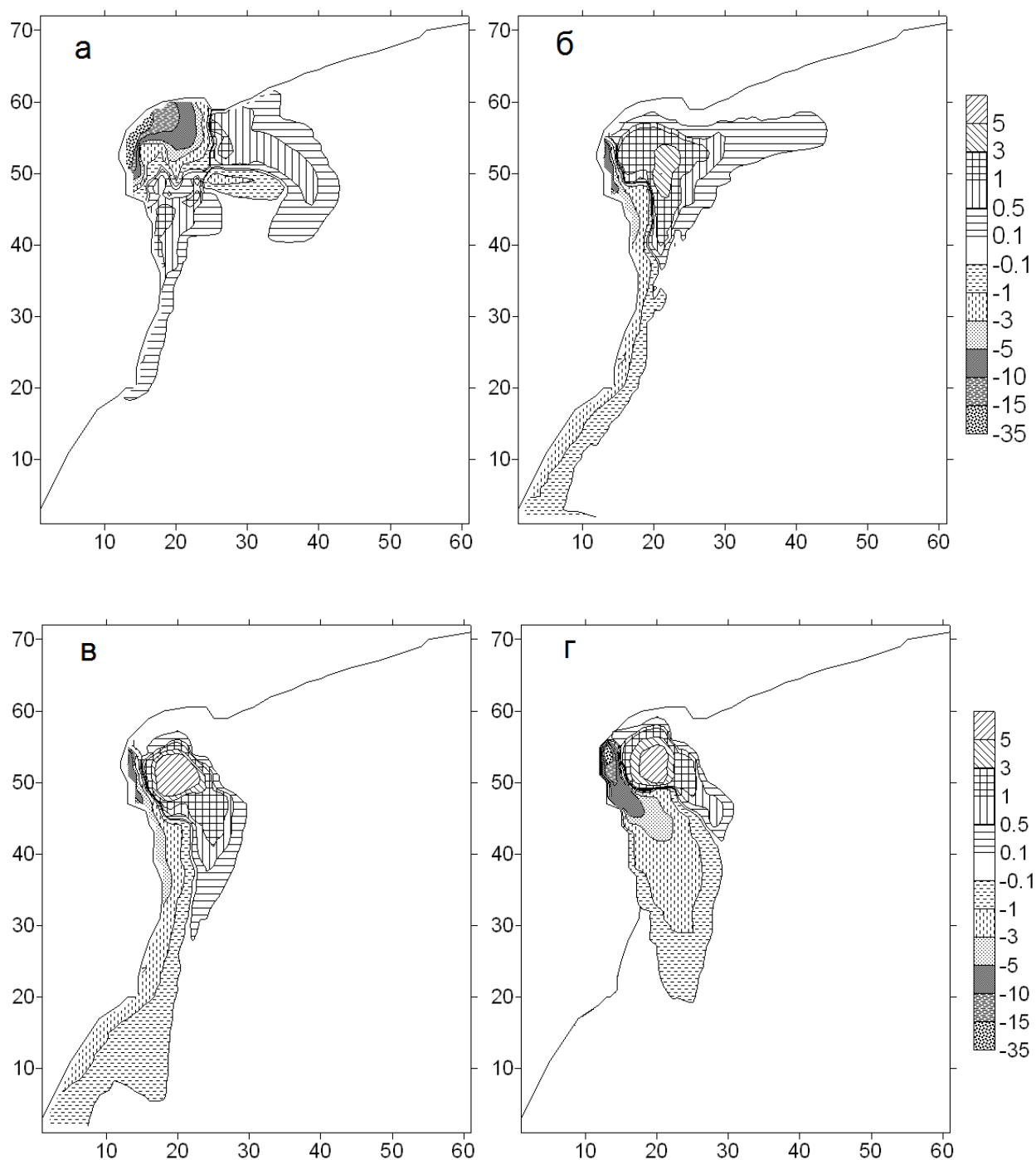


Рис. 4.14 – Изменение, в абсолютных единицах, концентраций консервативной примеси нейтральной плавучести в поверхностном слое, при сравнении современного и проектируемого вариантов выпусков сточных вод СБО «Северная» (с учетом функционирования СБО «Южная»), при ветрах разных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный.

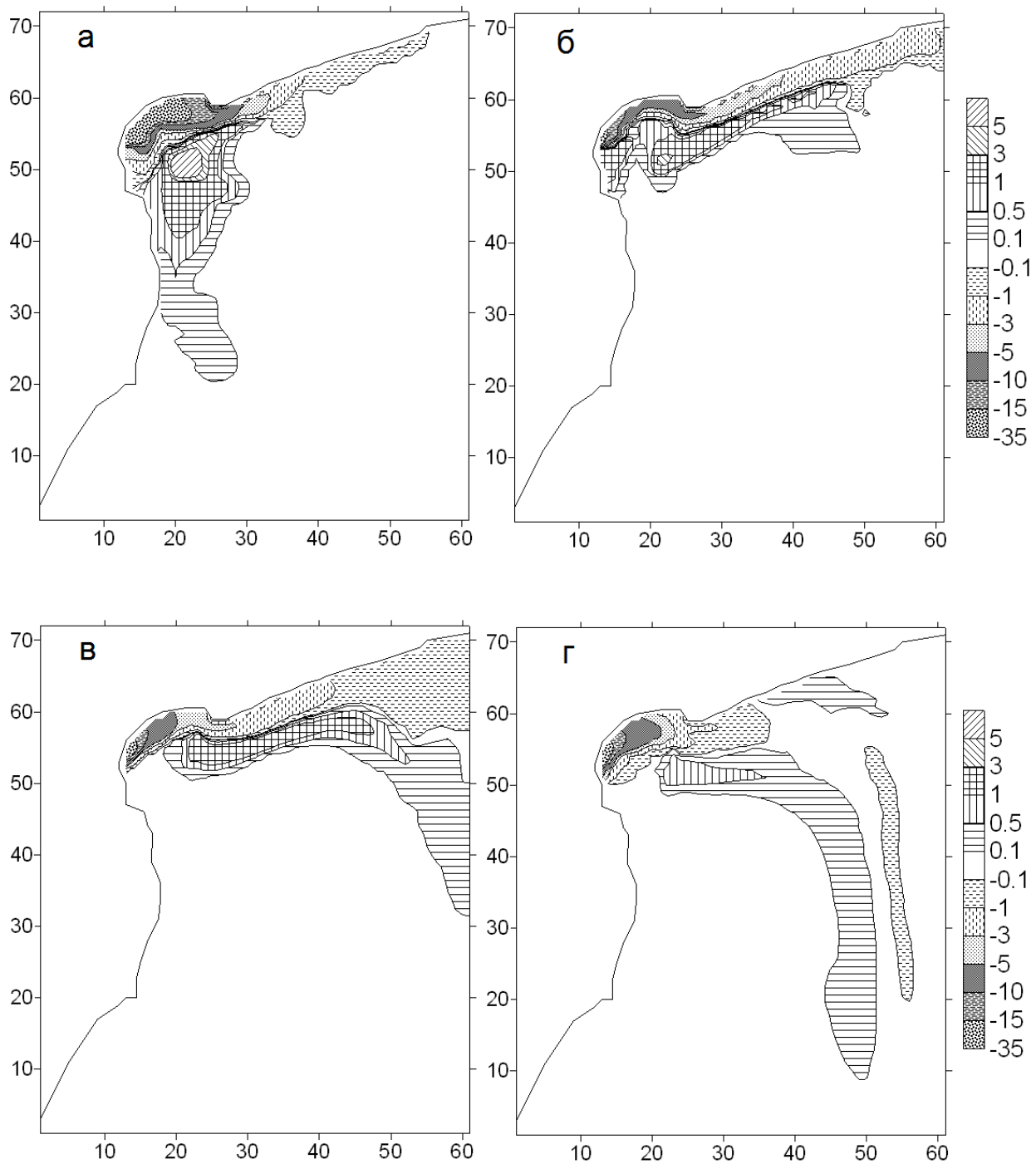


Рис. 4.15 – Изменение, в абсолютных единицах, концентраций консервативной примеси нейтральной плавучести в поверхностном слое, при сравнении современного и проектируемого вариантов выпусков сточных вод СБО «Северная» (с учетом функционирования СБО «Южная»), при ветрах разных направлений со скоростью 7 м/с: а) южный; б) юго-западный; в) западный; г) северо-западный.

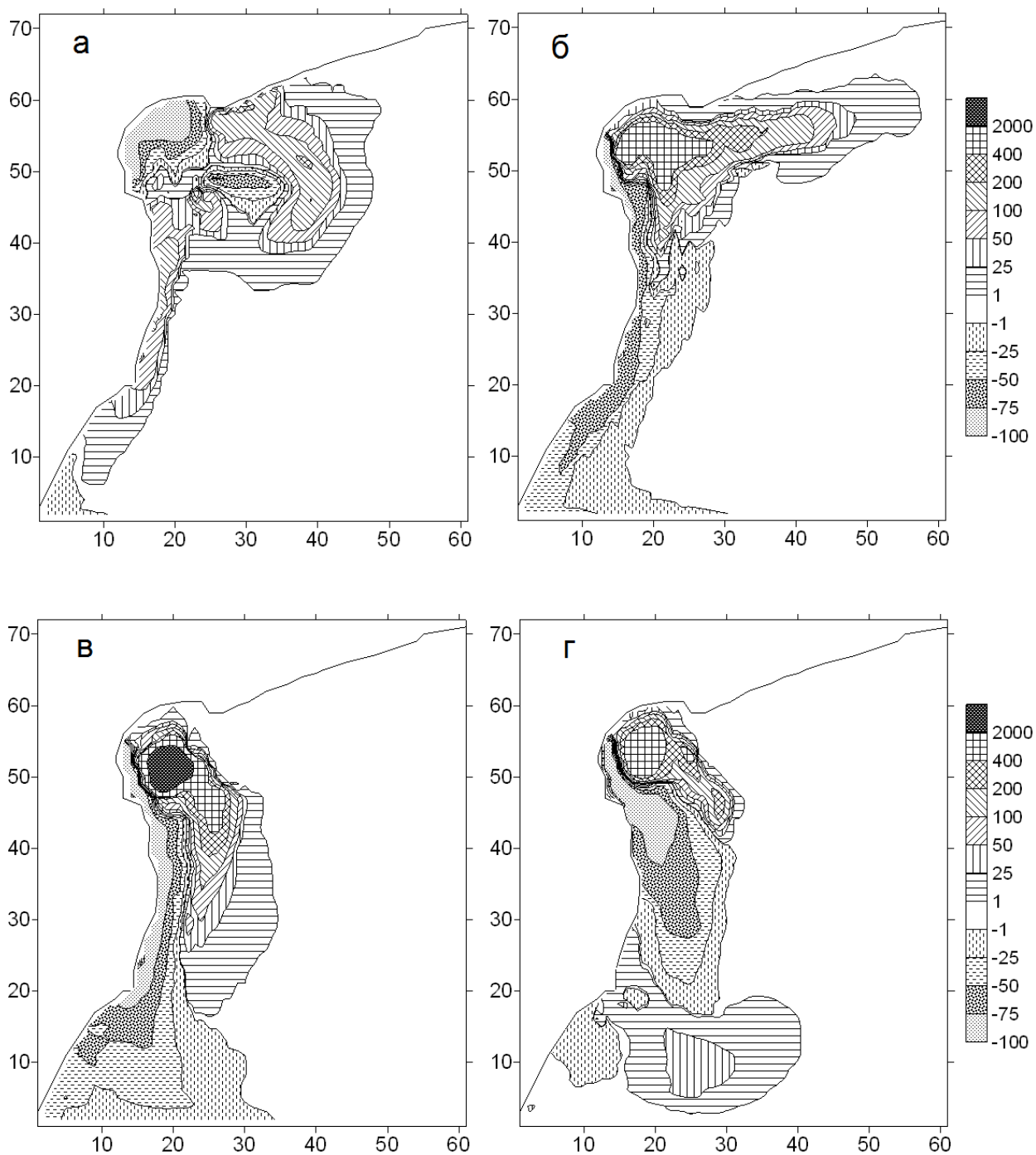


Рис. 4.16 – Изменение, в %, концентраций консервативной примеси нейтральной плавучести в поверхностном слое, при сравнении современного и проектируемого вариантов выпусков сточных вод СБО «Северная» (с учетом функционирования СБО «Южная»), при ветрах разных направлений со скоростью 7 м/с: а) северный; б) северо-восточный; в) восточный; г) юго-восточный.

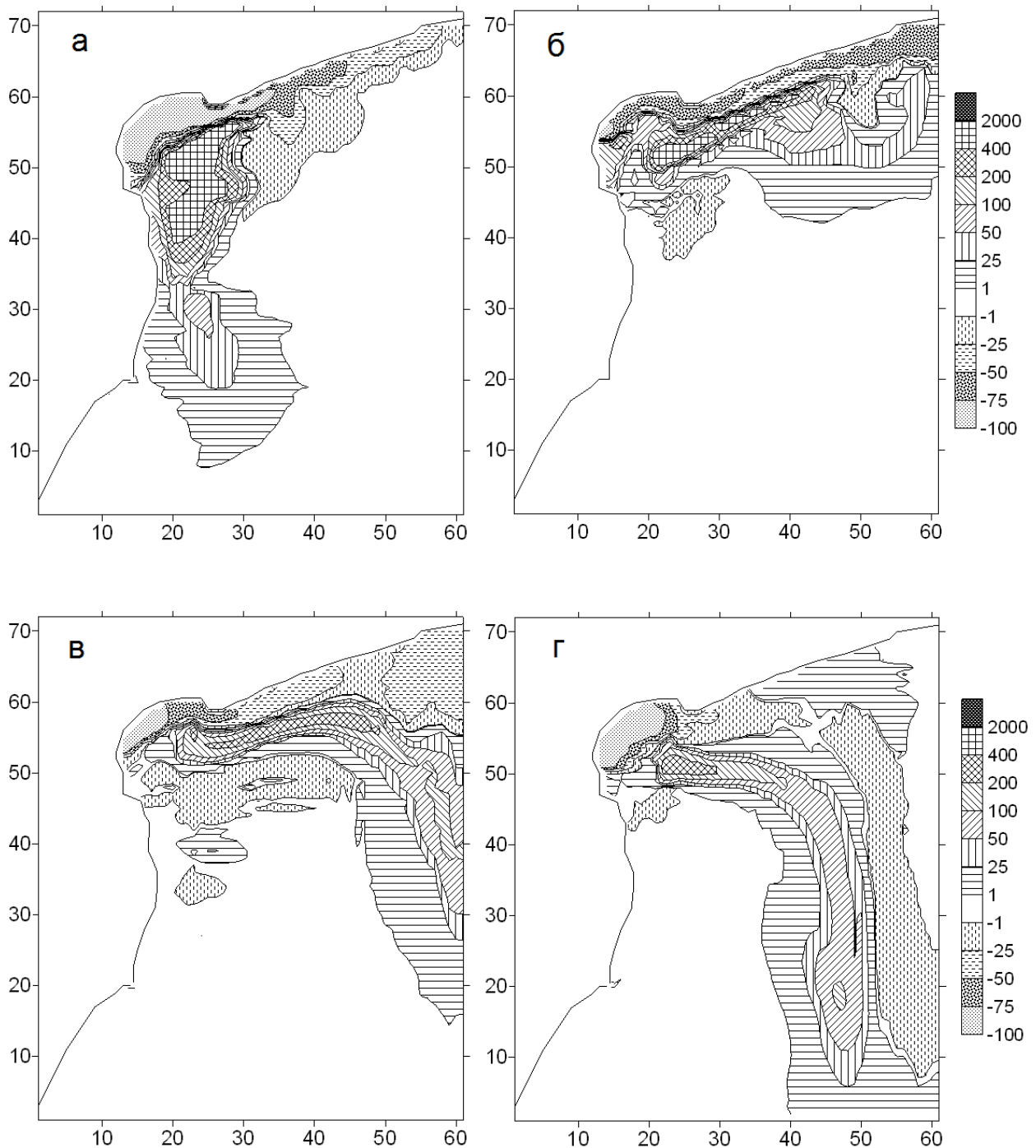


Рис. 4.17 – Изменение, в %, концентраций консервативной примеси нейтральной плавучести в поверхностном слое, при сравнении современного и проектируемого вариантов выпусков сточных вод СБО «Северная» (с учетом функционирования СБО «Южная»), при ветрах разных направлений со скоростью 7 м/с: а) южный; б) юго-западный; в) западный; г) северо-западный.

4.3 Оценка вклада береговых антропогенных источников в эвтрофирование вод Днепровско-Бугского участка СЗЧМ

Уровень трофности вод Одесского района – составной части Днепровско-Бугского приустьевых участка СЗЧМ, определяется, с одной стороны, поступлением минеральных и органических форм биогенных веществ с речным стоком Днепра и Южного Буга, а, с другой стороны, поступлением их со сбросными водами антропогенных источников, расположенных в прибрежной зоне исследуемого района.

Необходимым условием для прогнозирования уровней трофности и сапробности вод акватории Одесского района СЗЧМ, а также разработки стратегии их регулирования, является выделение вкладов речного стока и береговых антропогенных источников в формирование этих уровней.

Ранее, в разделе 2.9, была выполнена оценка относительных вкладов речного стока Днепра, Южного Буга, Днестра и совокупности береговых антропогенных источников относительно количества поставляемых в морскую среду биогенных веществ. Такая оценка справедлива при рассмотрении вод северо-западной части Черного моря в целом, однако не является показательной для акватории Одесского района, поскольку степень гидродинамического разбавления речных вод, достигающих границ этого района, и сбросных вод береговых антропогенных источников будет различной. В результате, существенные различия в количестве биогенных веществ, поступающих от этих двух главных групп источников, могут быть компенсированы разной степенью гидродинамического разбавления вод, которая зависит от локальных гидрологических условий и может быть учтена только с помощью гидродинамического моделирования.

При использовании гидротермодинамической модели [58, 60] расчетная область (ограниченная координатами $46^{\circ} 00' - 46^{\circ} 37'$ с. ш., $30^{\circ} 24' - 32^{\circ} 17'$ в. д.) аппроксимировалась пространственной сеткой 72×38 узлов с шагом 2000 м (рис. 4.18). Шаг по времени составлял 6 сек. для баротропной составляющей скорости течений и 72 сек. – для бароклининой. Использовались десять расчетных уровней по глубине в σ -системе координат. Расчет велся с усвоением данных срочных гидрометеорологических наблюдений на ГМС Одесса-порт за 1983 и 1986 гг. в период с марта по август. При расчете учитывалась сезонная изменчивость расходов речного стока Днепра, Южного Буга и Днестра. Расходы реки Днепр в весенний период увеличивались с $1300 \text{ м}^3/\text{с}$ в марте до $3300 \text{ м}^3/\text{с}$ в мае, реки Днестр – со $195 \text{ м}^3/\text{с}$ в марте до $320 \text{ м}^3/\text{с}$ в июне, а расход реки Южный Буг, наоборот, уменьшался с $200 \text{ м}^3/\text{с}$ в марте до 80

м³/с в мае. К концу августа расходы всех рек уменьшались от указанных значений до 690 м³/с для Днепра, 185 м³/с для Днестра и 50 м³/с для Южного Буга.

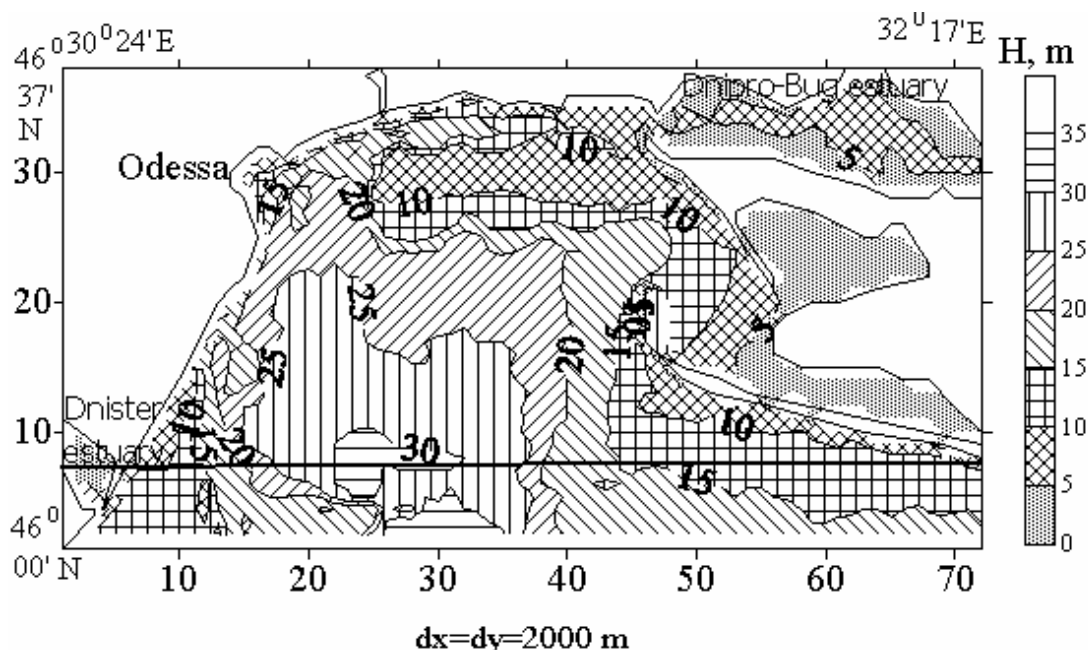


Рис. 4.18 – Днепро-Бугский приустьевой участок северо-западной части Черного моря (глубины в м). Линией отмечена нижняя граница расчетной области, используемая в модели эвтрофикации вод (без учета стока р.Днестр).

Характеристика ветровых условий в период расчета приведена в табл. 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 – Суммарная повторяемость ветров и штилей (%)

| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ | Штиль |
|--------|-----|------|-----|------|------|------|-----|------|-------|
| 1983г. | 0,6 | 15,6 | 1,9 | 16,9 | 0 | 20,0 | 1,3 | 40,0 | 3,8 |
| 1986г. | 8,1 | 2,5 | 1,3 | 20,6 | 11,9 | 3,8 | 5,6 | 23,1 | 23,1 |

Таблица 4.3 – Повторяемость (%) силы ветра (м/с)

| | 0 | 1 – 3 | 4 – 6 | 7 – 10 |
|--------|------|-------|-------|--------|
| 1983г. | 3,8 | 45,6 | 32,5 | 18,1 |
| 1986г. | 23,1 | 23,8 | 38,7 | 14,4 |

Видно, что ветровые условия рассматриваемых лет, определяющие изменчивость динамики вод и особенности распространения примеси от источников эвтрофирования, существенно различаются. В 1983 г.

доминировали ветра ветра СЗ, ЮЗ, ЮВ и СВ направлений, тогда как для 1986 г. характерно преобладание СЗ, ЮВ, Ю ветров и штилевых условий. Кроме того, при ветровых условиях лета 1983 г. было зарегистрировано неоднократное развитие глубокого прибрежного апвеллинга в Одесском районе. Проведение модельных расчетов при ветровых условиях различных лет позволяет оценить общность получаемых оценок, с точки зрения степени влияния на них различных гидрометеорологических условий.

На рис. 4.19 – 4.20 представлены результаты расчетов изменчивости пространственного распределения солености в поверхностном слое вод акватории, характеризующие масштабы распространения на акватории Днепровско-Бугского участка СЗЧМ трансформированных речных вод Днестра и Южного Буга. Расчеты выполнялись с учетом реальной изменчивости ветровых условий в 1983 г. и формируемых ими течений.

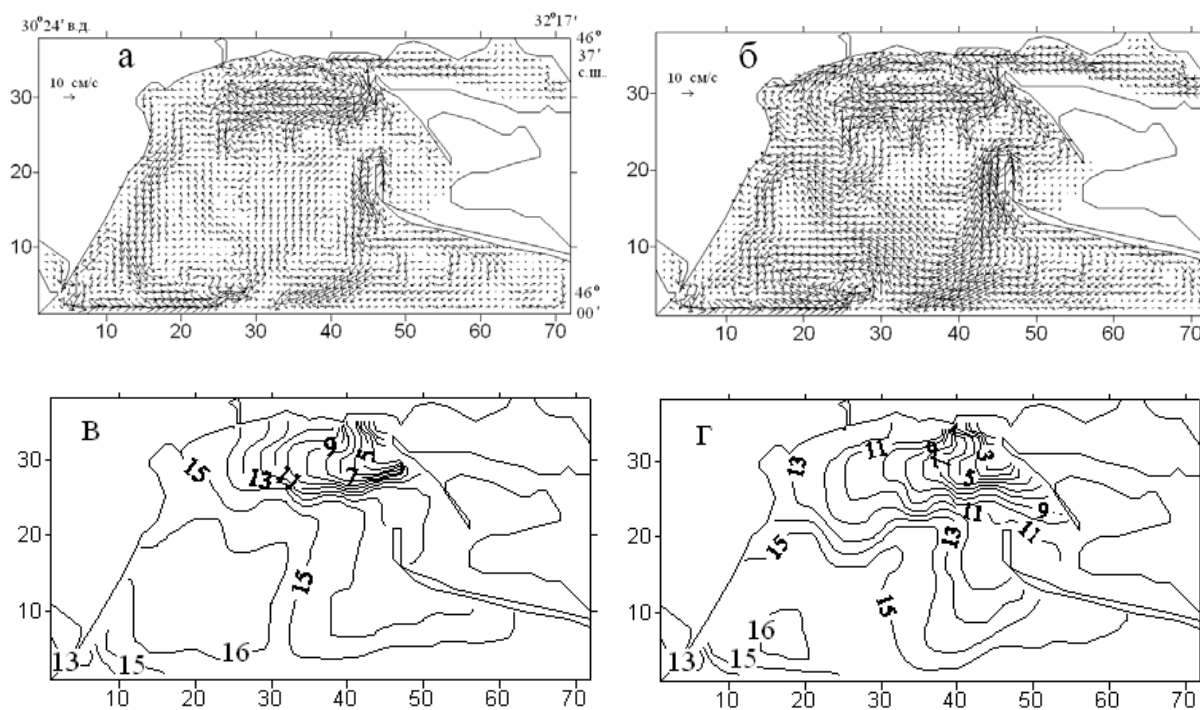


Рис. 4.19 – Поля векторов течений (а, б) и распределения солености (в, г) в поверхностном слое, характерные для середины апреля (а, в) и середины мая (б, г) 1983 г.

Представленные поля свидетельствуют о том, что весной язык пресных речных вод достигает берегов Одесского района в мае. Во второй половине мая – начале июня соленость вод в северной части акватории района снижается до 11 – 13 ‰, что согласуется с данными многолетних наблюдений ГМС Одесса-порт, приведенными в главе 1. В летний период, за счет сезонного уменьшения речного стока,

соленость вод исследуемой акватории постепенно повышается и в августе составляет 14 – 16 ‰.

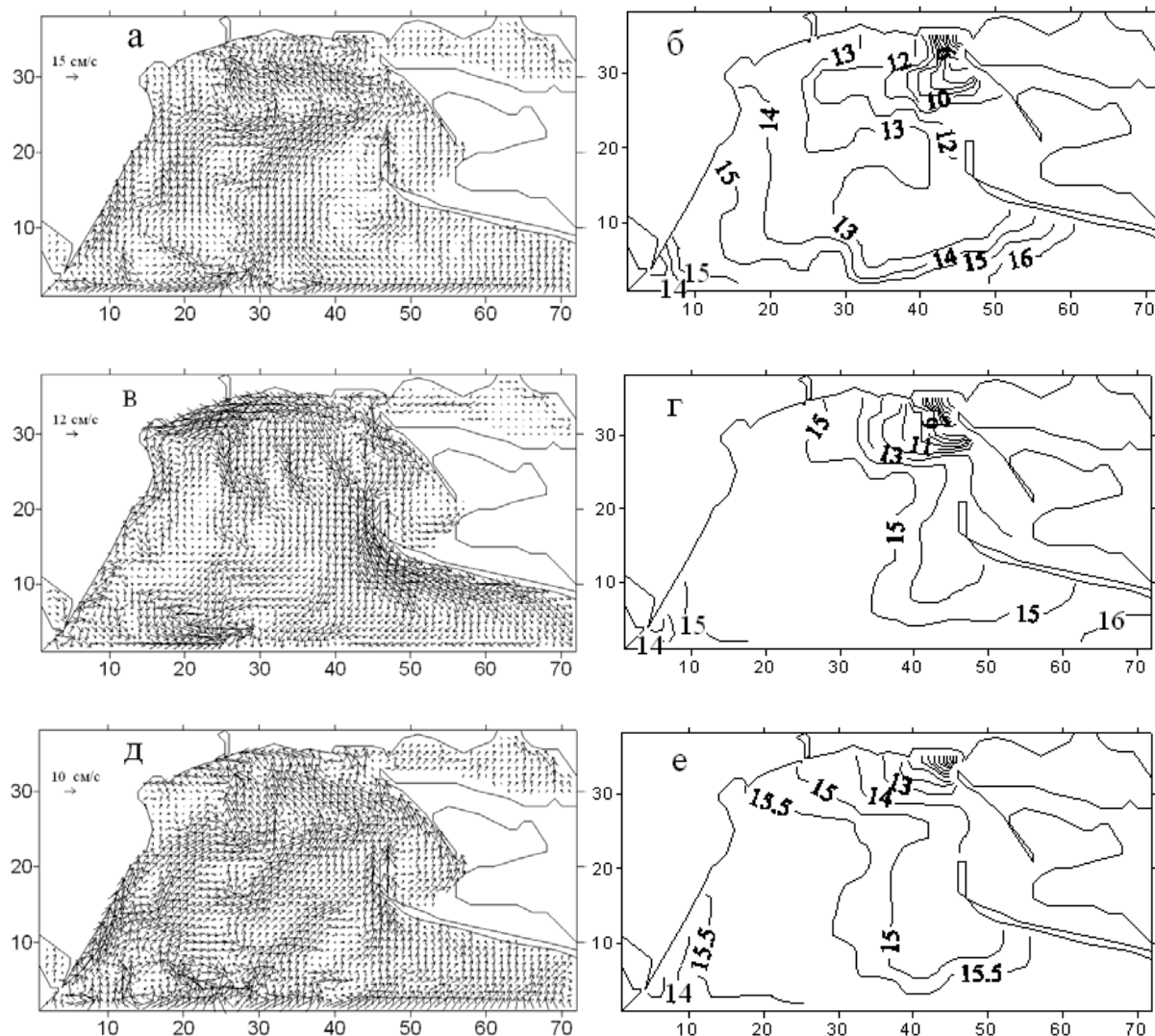


Рис. 4.20 – Поля векторов течений (а, в, д) и распределения солености (б, г, е) в поверхностном слое, характерные для середины июня (а, б), середины июля (в, г) и середины августа (д, е) 1983 г.

Для оценки вклада береговых источников (по сравнению с речным стоком) в формирование уровня трофности вод акватории Одесского района расчеты проводились в два этапа: с учетом и без учета сбросов биогенных веществ береговыми источниками загрязнения. Затем результаты расчетов сравнивались и в каждой точке расчетной области определялось процентное соотношение между полученными значениями концентраций моделируемых веществ, которое характеризует вклад береговых антропогенных источников в наблюдаемые в водах фотического

слоя их концентрации. Для определения процентного соотношения использовалось выражение аналогичное (4.55):

$$\eta_{i,j} = \left(C_{i,j}^{r+a} / C_{i,j}^r - 1 \right) \cdot 100\% , \quad (4.56)$$

где $\eta_{i,j}$ – процент вклада береговых антропогенных источников загрязнения в суммарную концентрацию моделируемого вещества в морской воде;

$C_{i,j}^{r+a}$ – концентрация моделируемого вещества в узле (i, j) расчетной сетки при учете сбросов береговых источников и речного стока;

$C_{i,j}^r$ – концентрация моделируемого вещества в том же узле сетки при учете только речного стока.

При расчетах использовались значения концентраций биогенных веществ в сточных водах береговых антропогенных источников и речном стоке, приведенные в главе 2. Поскольку в 2007 – 2008 гг., в связи с повышением уровня воды в Хаджибейском лимане, СБО «Северная» в летний период осуществляла сброс очищенных сточных вод в море, расчет проводился с учетом и без учета такого сброса. Ливневый сток в расчетах не учитывался, так как имеет эпизодический характер.

4.3.1 Оценка вклада береговых источников с учетом только гидродинамического разбавления

В первой серии численных экспериментов предполагалось, что моделируемые растворенные биогенные вещества имеют консервативный характер, т.е. их концентрация в воде определяется только интенсивностью гидродинамических процессов адвективного переноса и диффузионного турбулентного рассеивания примеси (гидродинамическим разбавлением). Цель расчетов – определение максимальных пространственных масштабов влияния береговых антропогенных источников на концентрацию биогенных веществ в фотическом слое акватории Днепроовско-Бугского приустьевого участка СЗЧМ.

Полученные при учете только гидродинамического разбавления сезонные оценки вкладов береговых антропогенных источников в формирование наблюдаемых в Днепроовско-Бугском районе концентраций минеральных форм биогенных элементов и органического вещества приведены на рис. 4.21 – 4.27. Заметим, что при используемом в расчетах

горизонтальном шаге расчетной сетки $\Delta x = \Delta y = 2000$ м, площадь начального разбавления составляет 4 км².

Из рис. 4.21 – 4.23 видно, что характер влияния береговых источников на формирование полей концентраций основных биогенных элементов существенно зависит от гидрометеорологических условий и величины речного стока. В период с марта по конец мая, в результате увеличения речного стока и интенсивного проникновения трансформированных речных вод в акваторию Одесского района, процент вклада береговых источников эвтрофирования вод, от суммарного поступления биогенных веществ из внешних источников, уменьшается (рис. 4.21) для фосфора фосфатов с 60-80 до 15-20 %, для азота аммонийного – с 10-15 до 5 %, для азота нитратов – с 60-80 до 10-15 % и для БПК₅ – с 8 до 0.5 -1.0 %.

Максимальные значения вкладов наблюдаются в районах сброса сточных вод СБО «Северная» и «Южная». В результате доминирования циклонического типа вдольбереговой циркуляции вод, области повышенных значений вкладов береговых источников могут смещаться к западной части открытой морской границы расчетной области. Поскольку язык трансформированных речных вод проникает в Одесский район вдоль северного побережья, то СБО «Северная» находится в зоне его влияния. Это приводит к уменьшению роли СБО «Северная» в формировании качества вод Одесского района в отношении отдельных видов биогенных веществ в весенний период. В зависимости от доминирующих ветровых условий, а также качественного состава речных вод, максимальные значения вкладов могут отмечаться как в районе расположения СБО «Северная» (при ветрах препятствующих проникновению языка загрязненных трансформированных речных вод в Одесский район), так и СБО «Южная».

В летний период, даже при отсутствии сброса сточных вод с СБО «Северная» (рис. 4.24-4.25), максимальные значения вкладов береговых источников в поступление в морскую среду биогенных веществ отмечаются вдоль западной границы исследуемой акватории в районе рекреационного побережья г.Одессы (от м.Большой Фонтан до м.Ланжерон) и Одесском заливе, что обусловлено сменой циклонического типа прибрежной циркуляции вод на антициклонический, развитием прибрежного апвеллинга при сгонных ветрах, способствующего поступлению загрязняющих веществ от СБО «Южная» в поверхностный слой, а также сбросами минерального азота ЗАО «Одесская сахарная компания».

В июле, при отсутствии сброса сточных вод с СБО «Северная», вклад береговых источников по сравнению с речным стоком может достигать для фосфора фосфатов 20 %, азота аммонийного – 7 %, азота нитратного – 60 %. Вклад береговых источников по показателю БПК₅ в течение всего

летнего периода не превышает 1-2 %. В августе речной сток достигает своего минимума, поэтому вклад береговых источников в эвтрофикацию вод Одесского района повышается по сравнению с июлем.

При осуществлении выпуска сточных вод от СБО «Северная» в морскую акваторию в летний период, роль береговых источников в эвтрофировании вод не только Одесского района, но и Днепровско-Бугского приустьевое участка в целом, существенно возрастает (рис. 4.26-4.27).

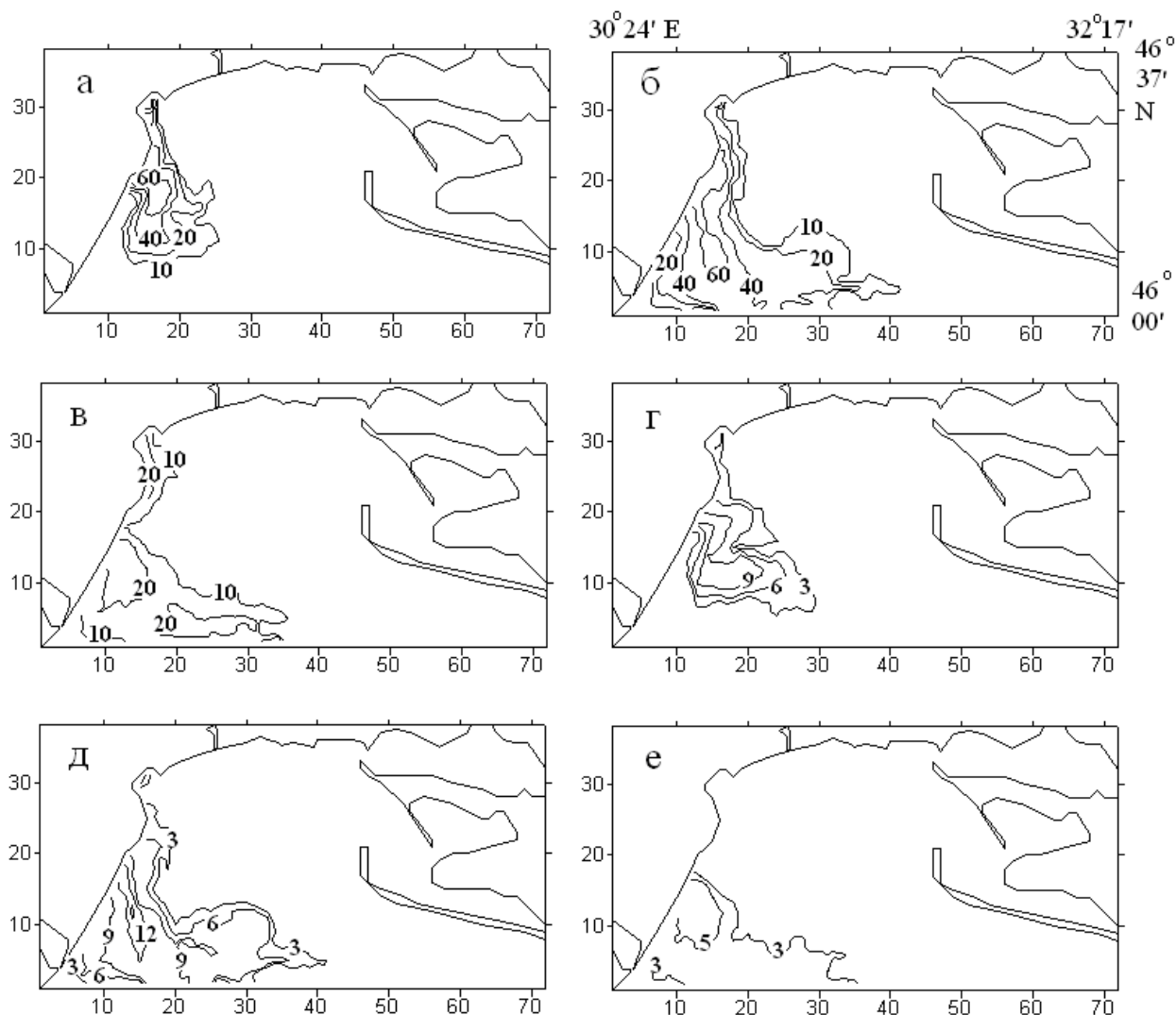


Рис. 4.21 – Вклад (%) береговых антропогенных источников Одесского района в формирование современного уровня содержания фосфора фосфатов (а, б, в) и азота аммонийного (г, д, е) в водах фотического слоя СЗЧМ, по отношению к выносу этих веществ с речным стоком, рассчитанный с помощью гидродинамической модели на конец марта (а, г), апреля (б, д) и мая (в, е). Гидрометеорологические условия – аналог 1983 г.

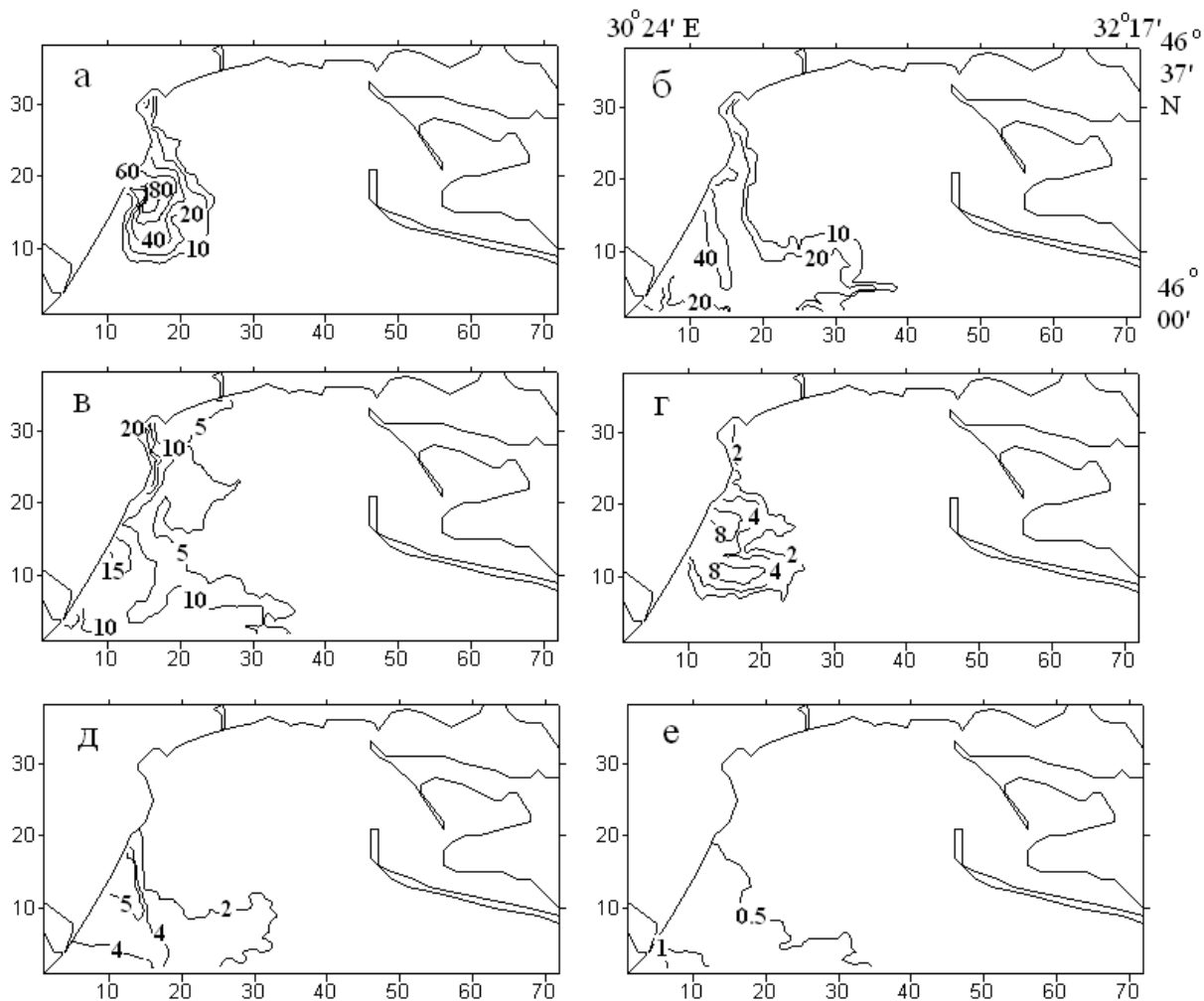


Рис. 4.22 – Вклад (%) береговых антропогенных источников Одесского района в формирование современного уровня содержания азота нитратного (а, б, в) и БПК₅ (г, д, е) в водах фотического слоя СЗЧМ, по отношению к выносу этих веществ с речным стоком, рассчитанный с помощью гидродинамической модели на конец марта (а, г), апреля (б, д) и мая (в, е). Гидрометеорологические условия – аналог 1983 г.

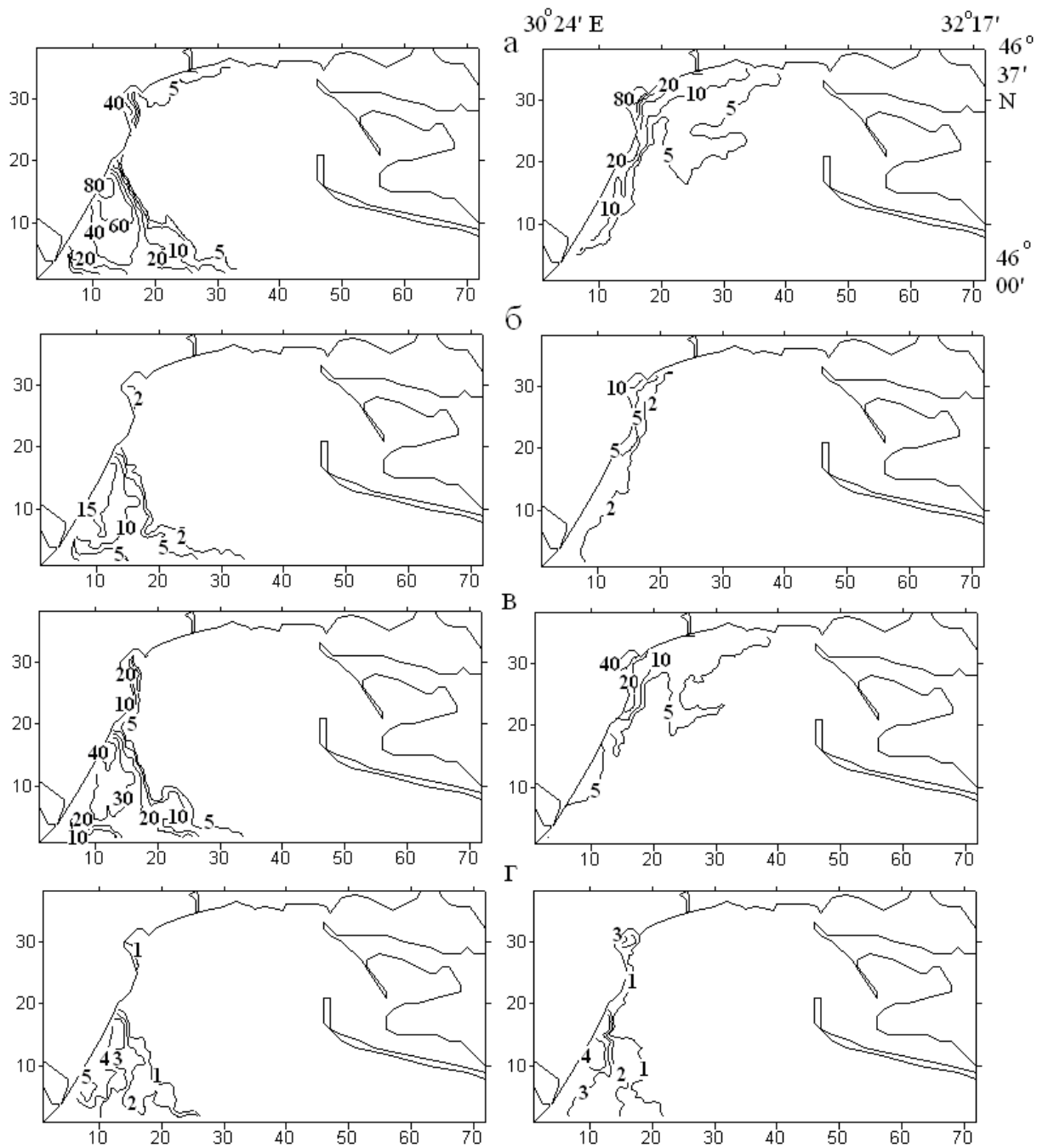


Рис. 4.23 – Вклад, в %, береговых антропогенных источников Одесского региона в формирование современного уровня содержания фосфора фосфатов (а), аммонийного (б) и нитратного (в) азота, БПК₅ (г) в фотическом слое СЗЧМ, по отношению к выносу этих веществ с речным стоком, рассчитанный по гидродинамической модели для середины апреля (слева) и мая (справа). Гидрометеорологические условия – аналог 1986 г.

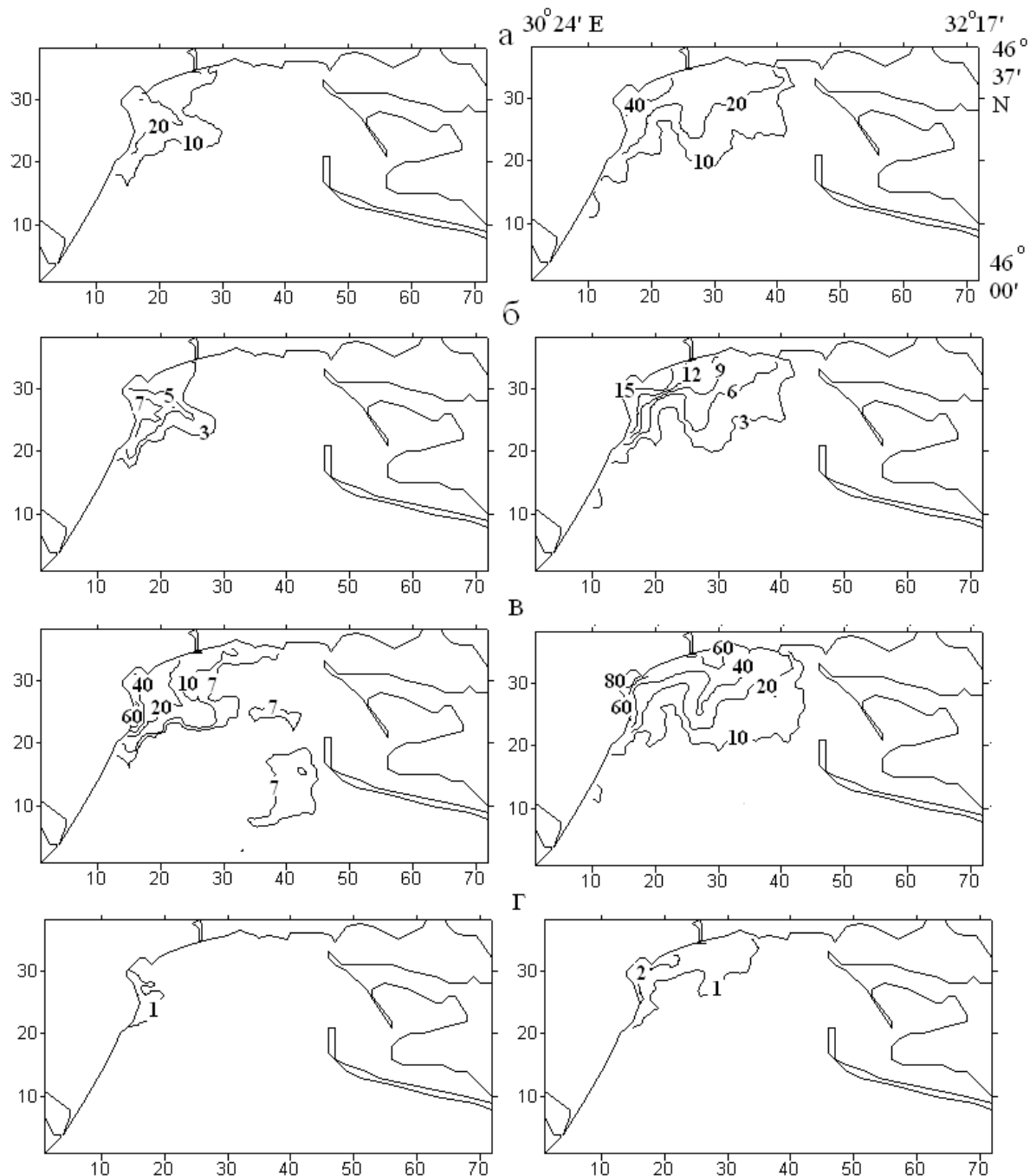


Рис. 4.24 – Вклад (%) береговых антропогенных источников Одесского района в формирование современного уровня содержания фосфора фосфатов (а), азота аммонийного (б) и нитратов (в), БПК₅ (г) в водах фотического слоя СЗЧМ, по отношению к выносу этих веществ с речным стоком, рассчитанный с помощью гидродинамической модели для середины июля (слева) и августа (справа) без учета сброса с СБО «Северная». Гидрометеорологические условия – аналог 1983 г.

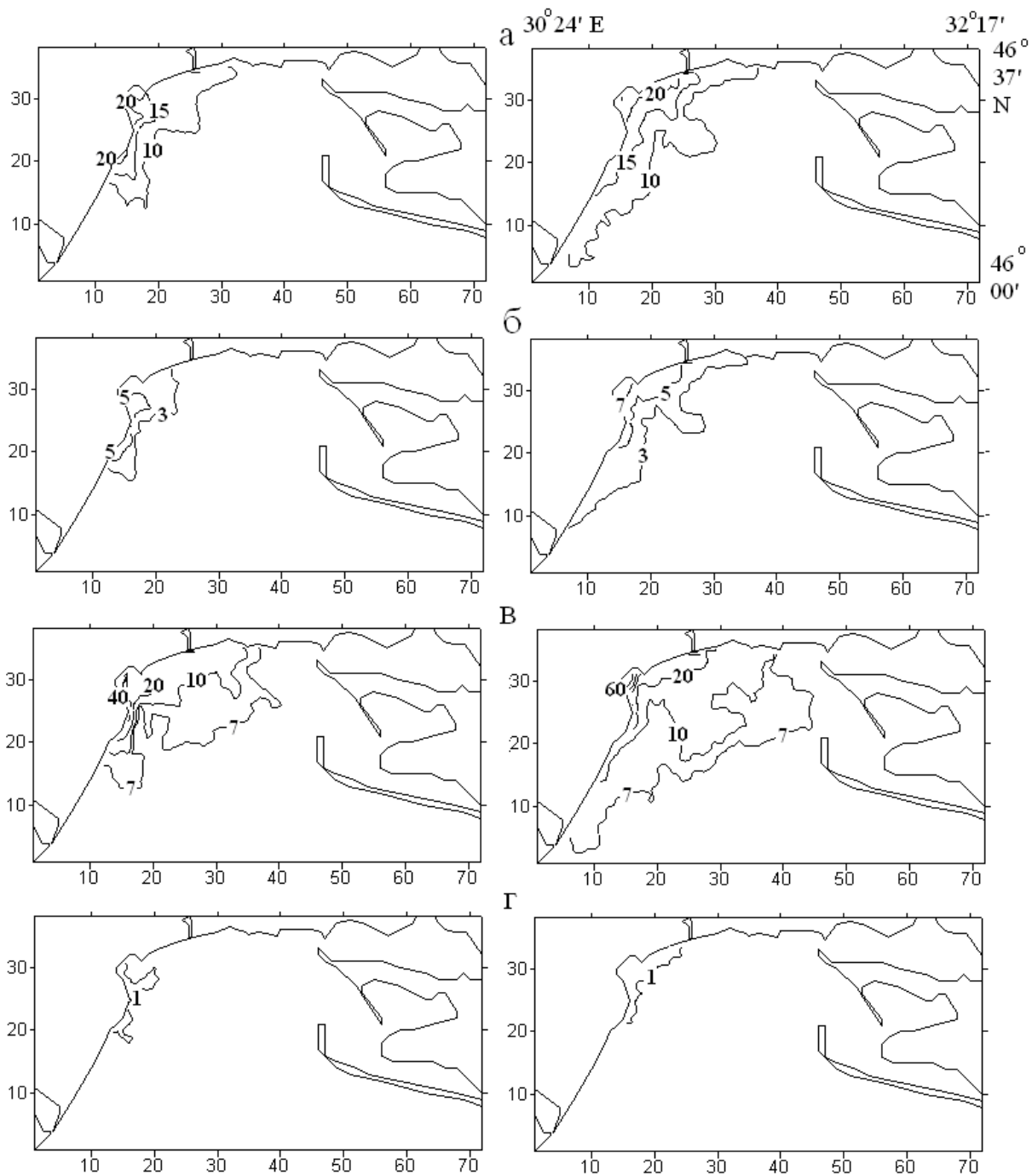


Рис. 4.25 – Вклад, в %, береговых антропогенных источников Одесского района в формирование современного уровня содержания фосфора фосфатов (а), азота аммония (б) и нитратов (в), БПК₅ (г) в фотическом слое СЗЧМ в середине июля (слева) и середине августа (справа) без учета сброса с СБО «Северная». Гидрометеорологические условия – аналог 1986 г.

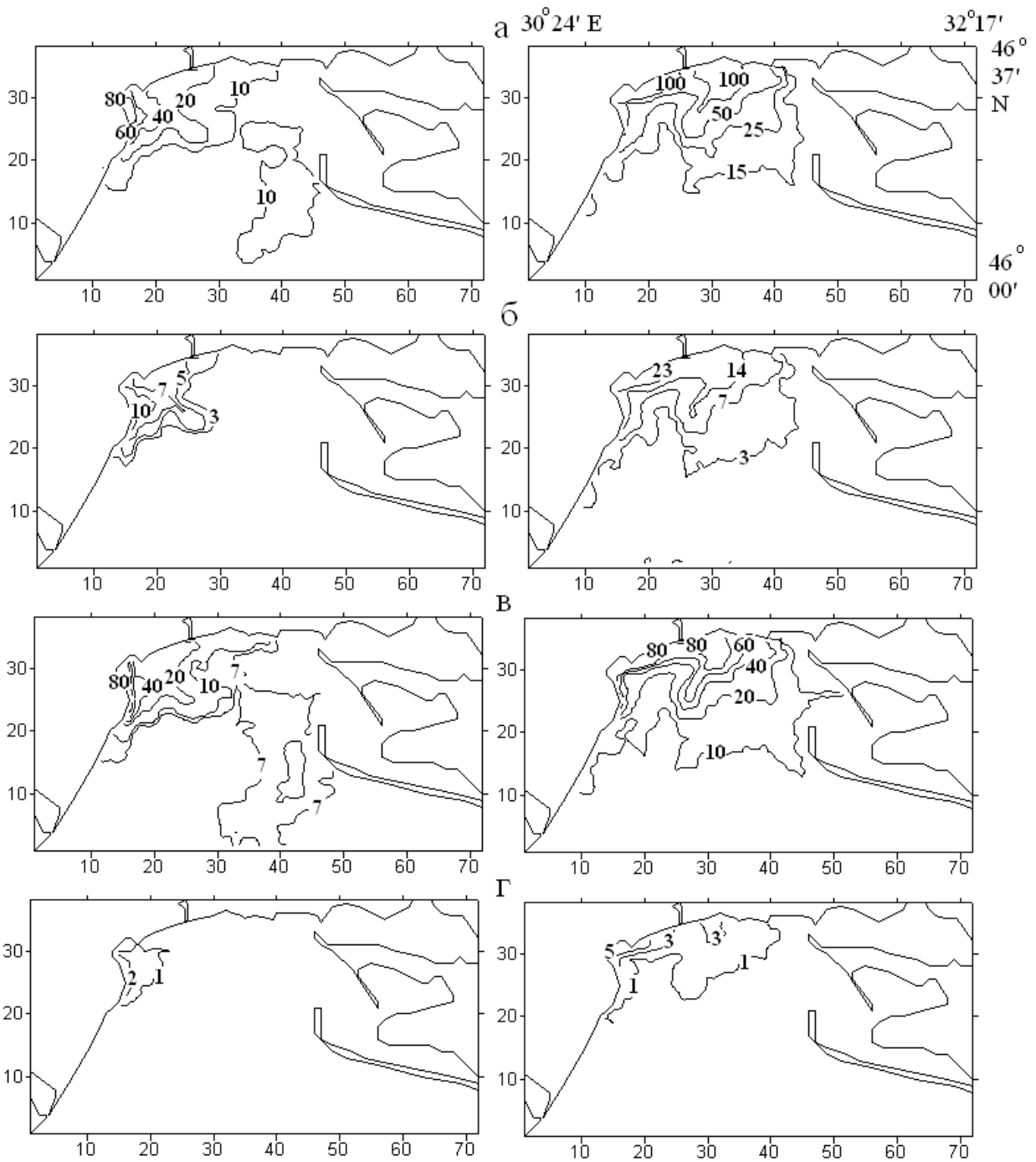


Рис. 4.26 – Вклад (%) береговых антропогенных источников Одесского района в формирование современного уровня содержания фосфора фосфатов (а), азота аммонийного (б) и нитратов (в), БПК₅ (г) в водах фотического слоя СЗЧМ, по отношению к выносу этих веществ с речным стоком, рассчитанный с помощью гидродинамической модели для середины июля (слева) и августа (справа) с учетом сброса с СБО «Северная». Гидрометеорологические условия – аналог 1983 г.

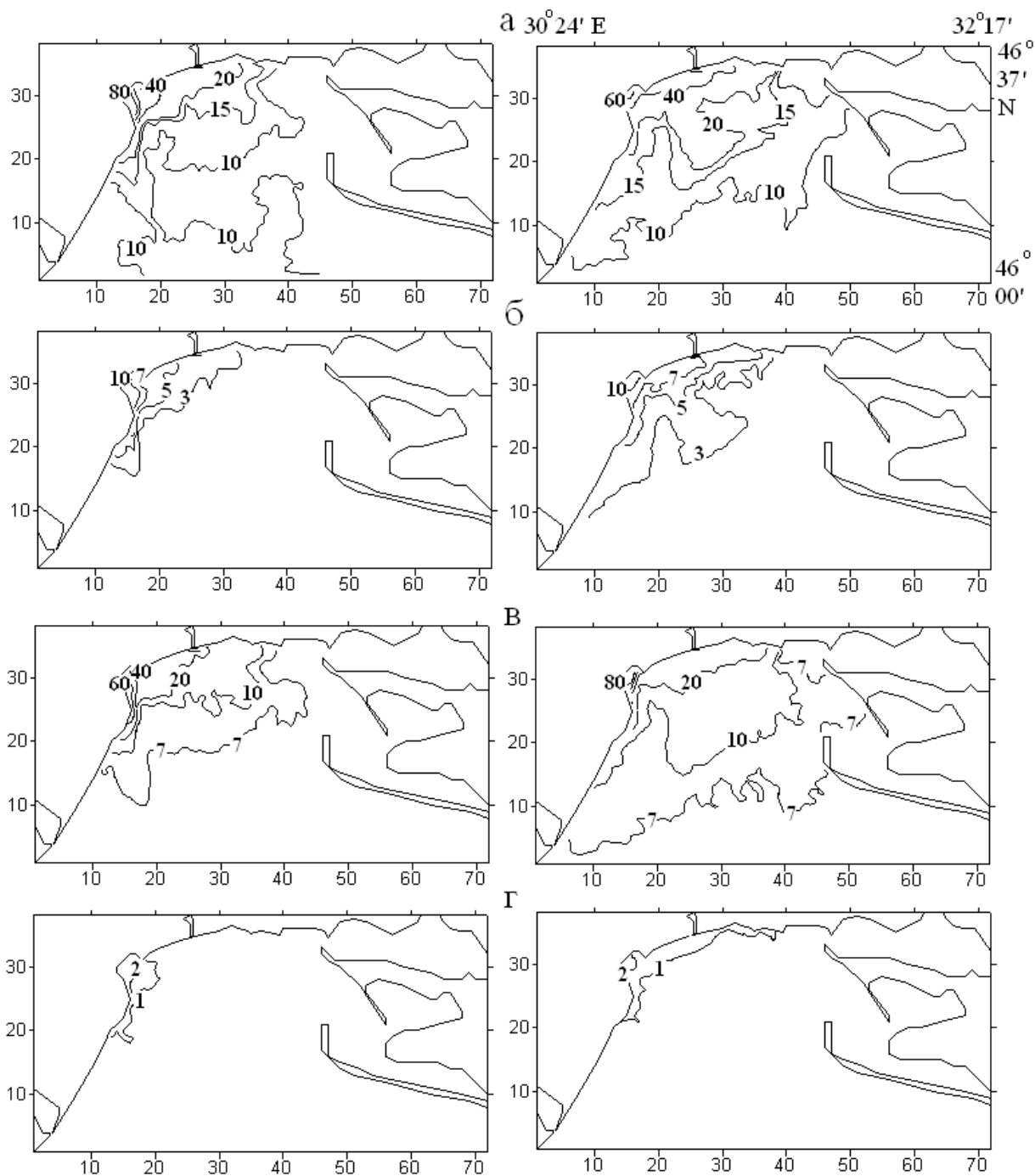


Рис. 4.27 – Вклад (%) береговых антропогенных источников Одесского района в формирование современного уровня содержания фосфора фосфатов (а), азота аммонийного (б) и нитратов (в), БПК₅ (г) в водах фотического слоя СЗЧМ, по отношению к выносу этих веществ с речным стоком, рассчитанный с помощью гидродинамической модели для середины июля (слева) и августа (справа) с учетом сброса с СБО «Северная». Гидрометеорологические условия – аналог 1986 г.

4.3.2 Оценка вклада береговых источников с учетом экосистемных процессов

Как известно, неорганические биогенные вещества в общем случае не являются консервативными и активно утилизируются фитопланктоном при фотосинтезе, а также регенерируются при минерализации органического вещества. Учитывая это, целесообразно оценить вклад береговых источников эвтрофирования вод и речного стока, используя трехмерную модель эвтрофикации морских вод [60, 63, 67], описание которой представлено в разделе 4.1. Калибровка параметров химико-биологического блока модели выполнена на основе данных экологического мониторинга Одесского района СЗЧМ, проводимого Одесским филиалом Института биологии южных морей в период с 1989 по 1999 гг. Результаты калибровки и верификации 1 – мерного (по вертикали) и 3 – мерного вариантов модели приведены в работах [60, 63, 67].

Расчеты выполнялись на сетке 68 x 32 узла (рис. 4.18) без учета стока р.Днепр, поскольку, как указано в работах [8, 13, 18, 67], его трансформированные воды не оказывают существенного прямого влияния на гидрохимический режим Одесского района СЗЧМ. В остальном, условия и схема расчетов оставались такими же, что и в предположении консервативности биогенных веществ. На южной морской границе расчетной области изменчивость термохалинной структуры задавалась на основе результатов расчета на сетке 72 x 38 узлов, с границей сдвинутой на 6 узлов южнее.

Полученные с использованием модели эвтрофикации сезонные оценки вкладов береговых антропогенных источников в формирование наблюдаемых в Днепровско-Бугском районе СЗЧМ концентраций минеральных форм биогенных элементов и органического вещества приведены на рис. 4.28 – 4.33.

Видно, что весной (рис. 4.28 – 4.30), при горизонтальном шаге расчетной сетки 2000 м, сбросы береговых источников обеспечивают прирост биомассы фитопланктона в Одесском районе от нескольких единиц (в мористой части) до 25 % (в прибрежной зоне), содержания БПК₅ – до 5 – 10 %, фосфора фосфатов – до 60 % от значений этих характеристик, обусловленных внутриэкосистемными биохимическими процессами трансформации веществ и влиянием речного стока Днепра и Южного Буга. Процент вклада береговых источников загрязнения зависит от гидрометеорологических условий и удаленности от прибрежной зоны.

Интенсивное поступление фосфора фосфатов со сточными водами береговых источников приводит к росту темпов синтеза органического

вещества и потребления минерального азота фитопланктоном. В результате, содержание аммонийного азота и нитратов в водах исследуемой акватории снижается. Максимальные значения вкладов береговых антропогенных источников в загрязнение морской среды соответствуют районам сброса сточных вод СБО «Северная», «Южная», г. Ильичевск и Ильичевского морского порта.

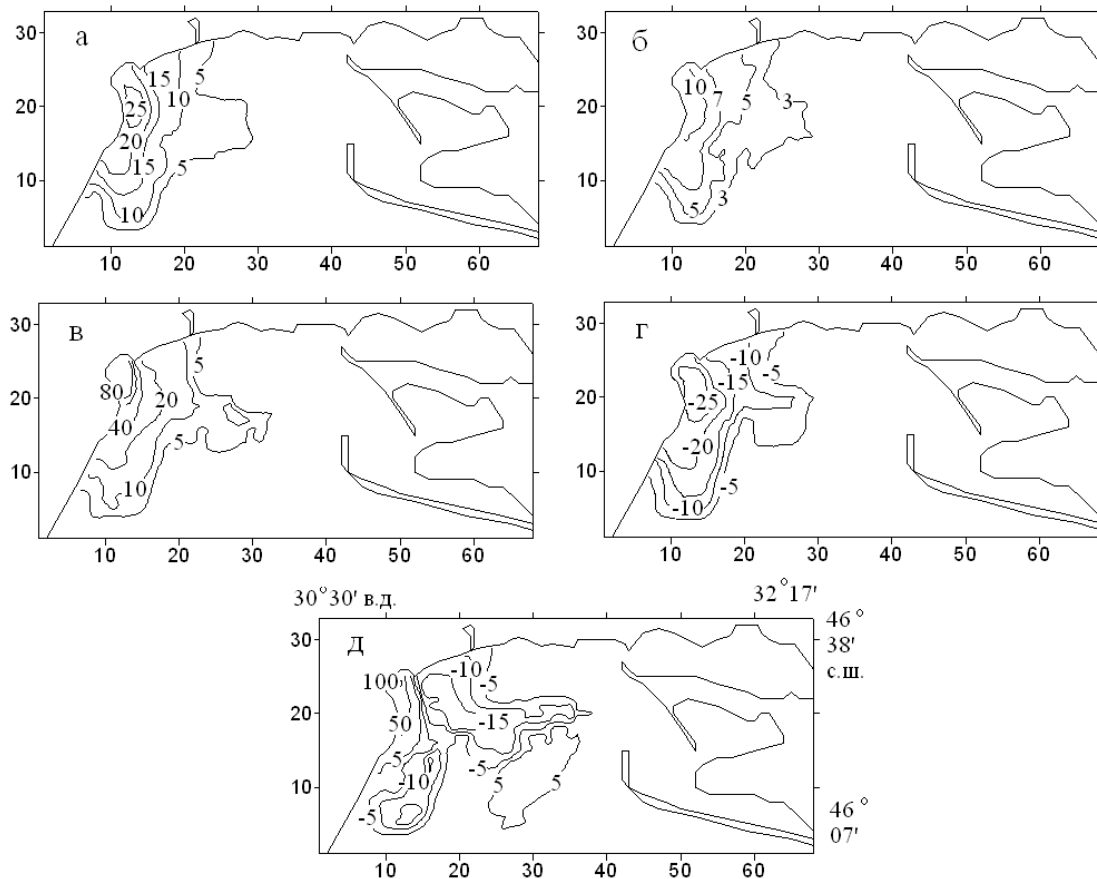


Рис. 4.28 – Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации вклад (%) береговых антропогенных источников загрязнения в формирование в фотическом слое СЗЧМ биомассы фитопланктона (а), БПК₅ (б), фосфора фосфатов (в), азота аммонийного (г) и нитратного (д) в третьей декаде апреля. Гидрометеорологические условия – аналог 1983 г.

Из рис. 4.29 видно, что в мае, когда сток р.Днепр максимален, а увеличение температуры воды способствует интенсификации процессов регенерации минеральных форм биогенных элементов, вклад береговых источников в эвтрофирование вод акватории Одесского района существенно уменьшается по сравнению с апрелем.

Оценки вкладов береговых источников для летнего сезона при отсутствии выпуска сточных вод от СБО «Северная» и при его наличии приведены на рис. 4.31 – 4.33.

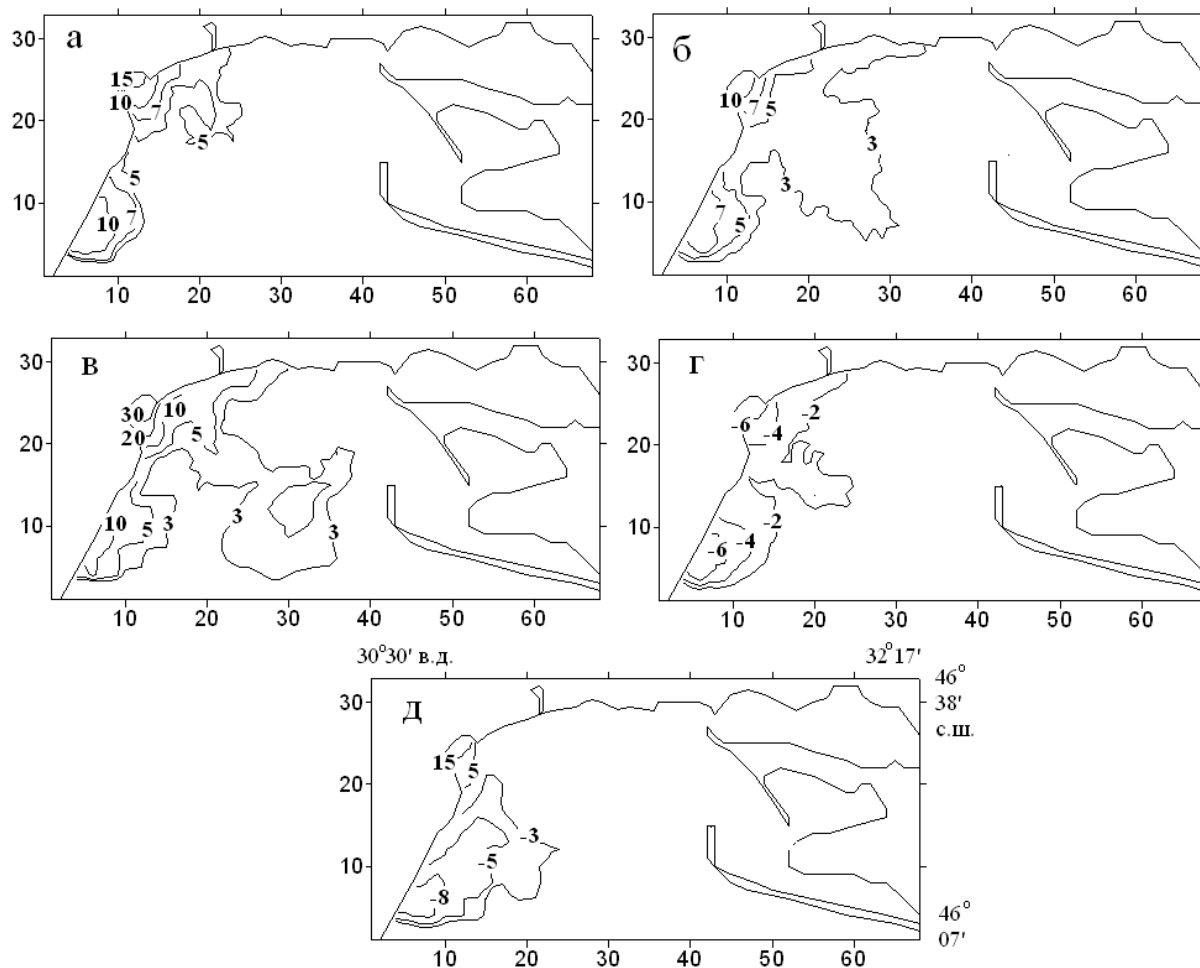


Рис. 4.29 – Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации вклад (%) береговых антропогенных источников в формирование в фотическом слое СЗЧМ биомассы фитопланктона (а), БПК₅ (б), фосфора фосфатов (в), азота аммонийного (г) и нитратного (д) в третьей декаде мая. Гидрометеорологические условия – аналог 1983 г.

Как видно из приведенных рисунков, несмотря на уменьшение речного стока, прямой вклад береговых источников в эвтрофирование вод Одесского района значительно снижается по сравнению с весенним периодом года. Объясняется это тем, что в летний период интенсифицируются внутриэкосистемные процессы регенерации неорганических соединений биогенных элементов в ходе минерализации

органического вещества. Уменьшается время прохождения биогенными элементами их биогеохимических циклов. При оптимальном режиме эксплуатации, летом прекращается сброс сточных вод СБО «Северная» в море. Обостряется сезонный пикноклин, затрудняющий поступление сточных вод из заглубленных выпусков в фотический слой. В результате, приток минеральных форм биогенных элементов за счет минерализации органического вещества становится сравнимым с поставками береговых источников, роль береговых антропогенных источников как поставщика биогенных элементов и стимулятора процесса первичного продуцирования органического вещества существенно уменьшается. В частности, прирост биомассы фитопланктона, обусловленный сбросами береговых источников, уменьшается до 3-4 %, концентрации фосфатов – до 5-7 %, аммония – до 3-5 %, БПК₅ – до 3 %.

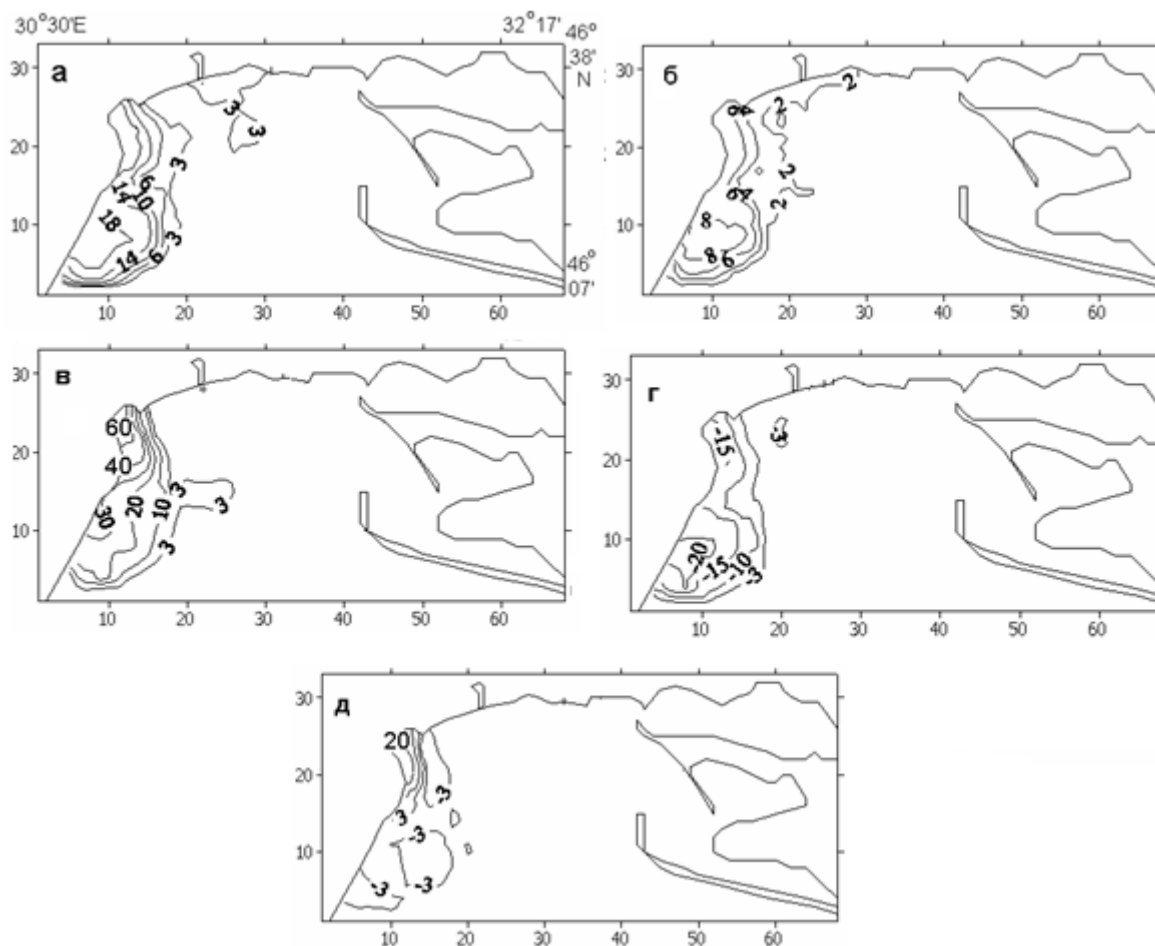


Рис. 4.30 – Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации для конца апреля 1986 г. вклад (в %) береговых антропогенных источников Одесского района в формирование в фотическом слое СЗЧМ биомассы фитопланктона (а), БПК₅ (б), содержания фосфора фосфатов (в), аммонийного (г) и нитратного (д) азота.

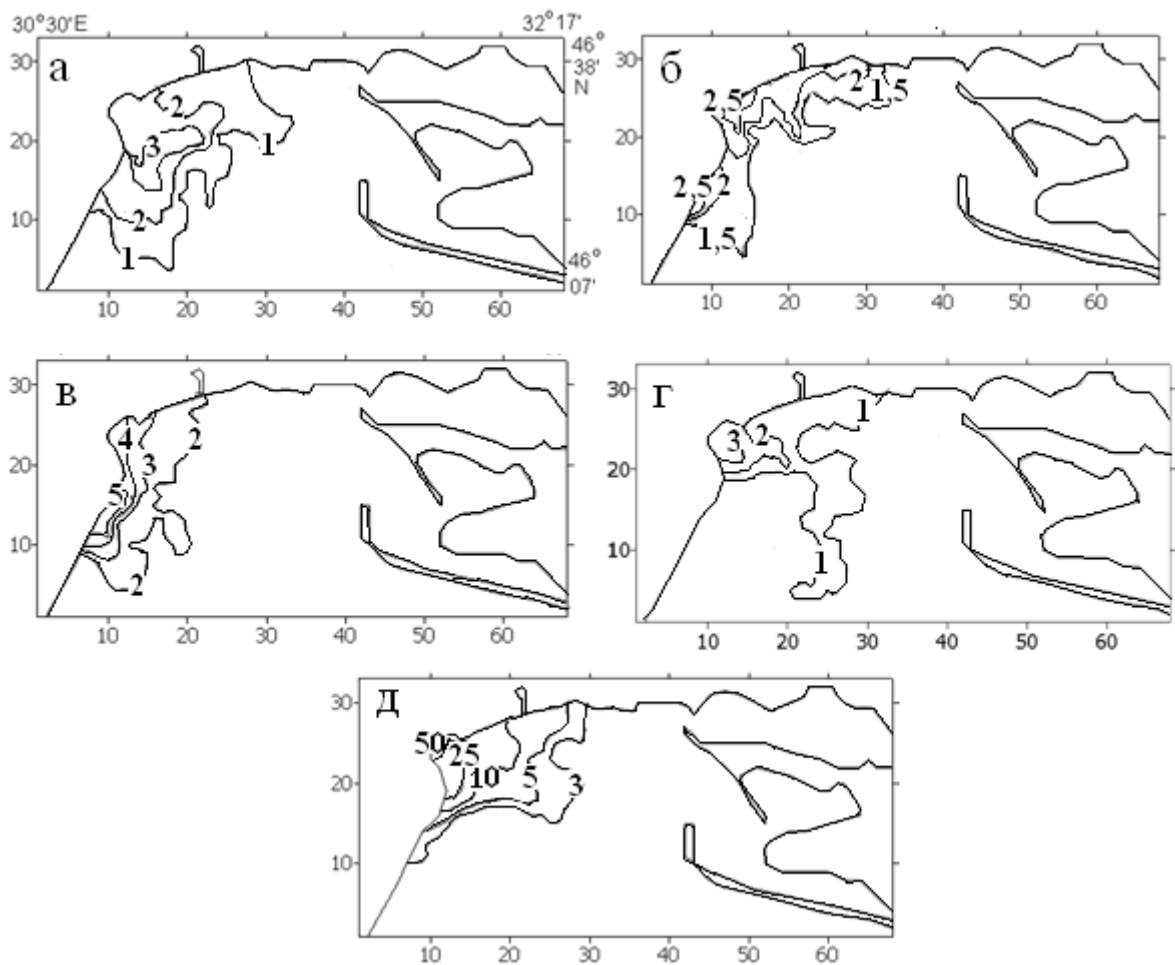


Рис. 4.31 – Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации для середины августа 1986 г. вклад, в %, береговых антропогенных источников Одесского района в формировании в фотическом слое СЗЧМ биомассы фитопланктона (а), БПК₅ (б), содержания фосфора фосфатов (в), аммонийного (г) и нитратного (д) азота при отсутствии выпуска сточных вод СБО «Северная».

Однако при сбросе сточных вод СБО «Северная» в море в летний период вклад береговых источников в загрязнение морской среды значительно возрастает и достигает 10-15 % для биомассы фитопланктона, 10 % – для БПК₅ и 30 % – для фосфора фосфатов. Увеличение поставок СБО «Северная» в морскую среду фосфора фосфатов приводит к уменьшению концентраций минерального азота в центральной части Днепровско-Бугского приустьевого района, возрастанию биомассы фитопланктона и концентрации лабильного органического вещества.

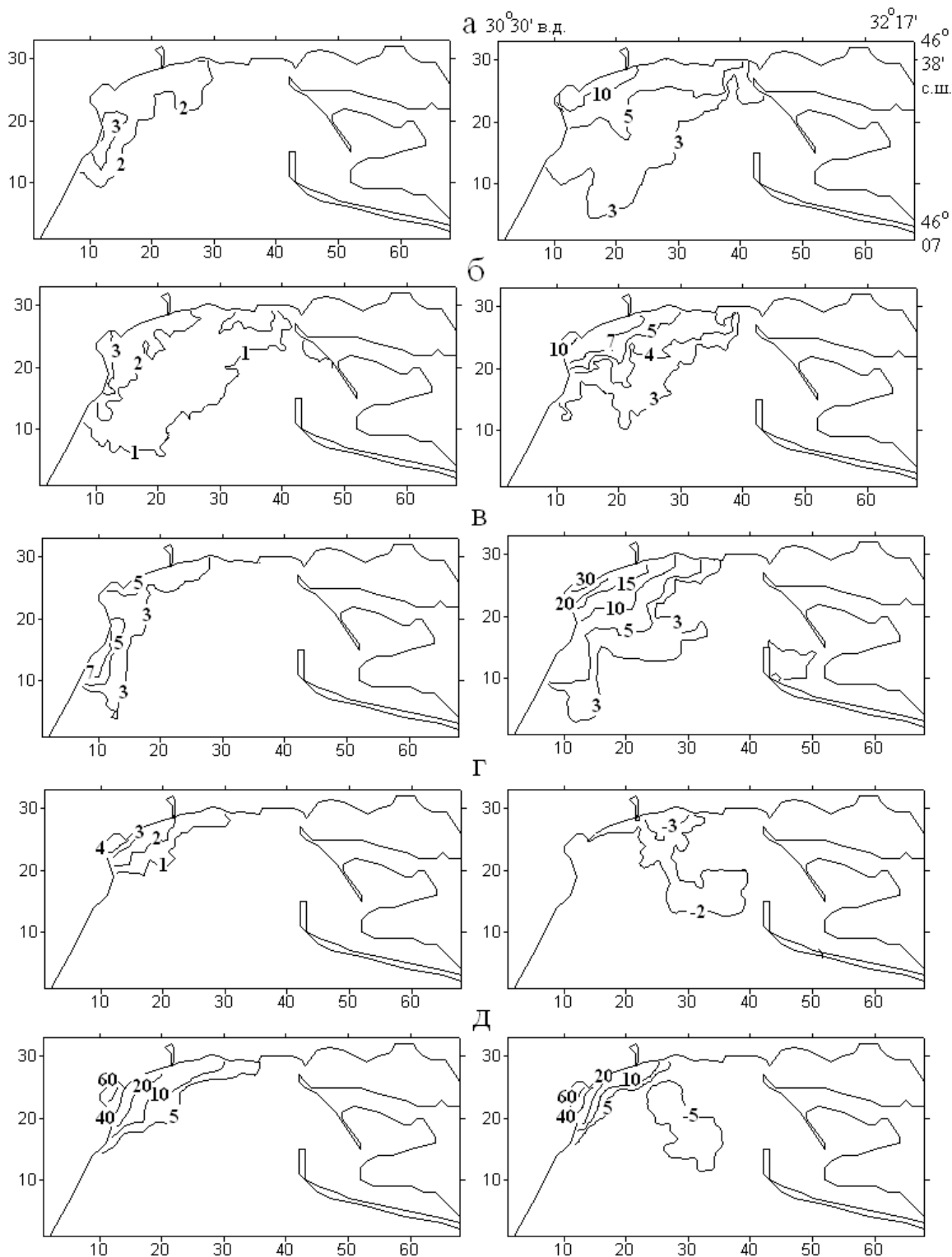


Рис. 4.32 – Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации вклад (%) береговых антропогенных источников загрязнения в формирование в фотическом слое СЗЧМ биомассы фитопланктона (а), БПК₅ (б), фосфора фосфатов (в), азота аммонийного (г) и нитратного (д) в конце *июля* при отсутствии (слева) и наличии (справа) выпуска сточных вод СБО «Северная». Гидрометеорологические условия – аналог 1983 г.

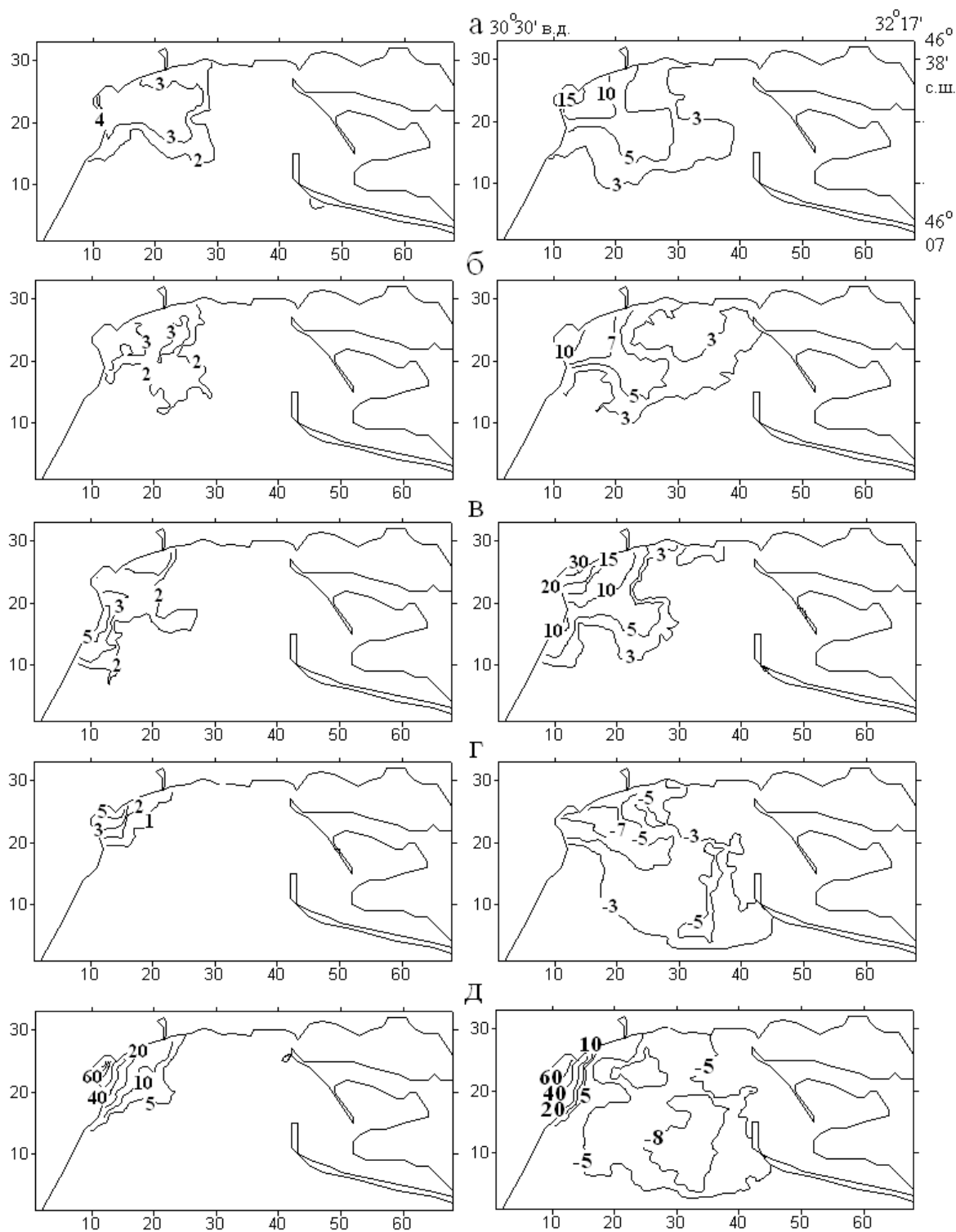


Рис. 4.33 – Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации вклад (%) береговых антропогенных источников загрязнения в формирование в фотическом слое СЗЧМ биомассы фитопланктона (а), БПК₅ (б), фосфора фосфатов (в), азота аммонийного (г) и нитратного (д) в конце *августа* при отсутствии (слева) и наличии (справа) выпуска сточных вод СБО «Северная». Гидрометеорологические условия – аналог 1983 г.

Описанные выше оценки вкладов получены при масштабе начального разбавления сточных вод 4 км^2 и, следовательно, справедливы при рассмотрении Одесского района в целом, как составной части Днепроовско-Бугского приустьевого участка СЗЧМ. Если же рассматривать отдельно прибрежную зону моря, то очевидно, что по мере приближения к источникам загрязнения их вклад в формирование качества вод будет возрастать.

На рис. 4.31 – 4.36 приведены оценки вклада береговых источников в эвтрофирование вод Одесского района СЗЧМ, полученные с использованием модели эвтрофикации и формулы (4.55) при масштабе начального разбавления $0,25 \text{ км}^2$ (горизонтальный шаг расчетной сетки 500 м). Расчеты проводились только для акватории Одесского района (рис. 4.2), которая покрывалась горизонтальной расчетной сеткой 61×72 узла с пространственным шагом 500 м. Использовались 10 расчетных уровней в σ -системе координат. Счет велся на 30 суток модельного времени при метеорологических условиях (ветер, температура воздуха) августа 1983 и 1986 гг. Начальное распределение моделируемых характеристик по глубине и их значения на морских границах рассматриваемой акватории задавались исходя из результатов расчетов для всего Днепроовско-Бугского приустьевого участка СЗЧМ. Исходное распределение характеристик в горизонтальной плоскости полагалось однородным.

Как указано в главе 2, СБО «Северная» является наиболее мощным из всех идентифицированных береговых источников загрязнения морской среды. При определении оценок вклада антропогенных источников рассматривались три варианта сброса сточных вод с СБО «Северная»: при наличии сброса с СБО «Северная» в море на расстоянии 300 м от берега и при его отсутствии, а также при проектируемом выпуске сточных вод на расстоянии 4 км от берега.

Как показали расчеты, при отсутствии выпуска сточных вод с СБО «Северная» (рис. 4.34, 4.35, 4.38, 4.39) максимальные значения прироста биомассы фитопланктона (до 15 %), величины БПК₅ (8 – 15 %) и концентрации фосфора фосфатов (25 – 60 %) в большинстве рассмотренных случаев располагаются в прибрежной зоне на участке между выпусками сточных вод СБО «Южная», г. Ильичевск и Ильичевского морского порта. Хотя, при доминировании ветров с южной составляющей, возможно смещение областей максимумов указанных характеристик севернее выпуска сточных вод СБО «Южная» на участок прибрежной зоны между мысами Большой и Малый Фонтан (рис. 4.39).

Расположение максимумов вкладов береговых источников в формирование концентраций аммонийного азота более изменчиво. Максимальные значения вкладов (до 10 – 15 %) отмечаются как в районе м.Большой Фонтан и несколько южнее, так и в Одесском заливе.

Выпуски дренажных вод, а также сточных вод ЗАО «Одесская сахарная компания», расположенной на побережье Одесского залива, являются значимыми источниками поступления в морскую среду нитратного азота, поэтому области максимальных значений вкладов этих источников в формирование концентраций нитратного азота вытянуты вдоль западного рекреационного побережья исследуемой акватории и превышают 100 %.

При одновременном функционировании СБО «Северная» и «Южная» (рис. 4.36, 4.37, 4.40, 4.41) масштабы влияния и значения вкладов береговых антропогенных источников в эвтрофировании вод акватории Одесского района СЗЧМ значительно возрастают. В результате их функционирования биомасса фитопланктона и концентрация лабильного косого органического вещества могут увеличиваться до 40-90 %, концентрация фосфора фосфатов – в 2 – 4 раза за пределами Одесского залива и в 10 – 15 раз в районе выпуска СБО «Северная».

Особенно следует отметить роль СБО «Северная» как поставщика минерального фосфора, поскольку при ее функционировании интенсивное поступление фосфора фосфатов в морскую среду приводит к росту темпов синтеза органического вещества и потребления минерального азота фитопланктоном. В результате, содержание аммонийного азота и, в меньшей мере, нитратов (на удалении от источников) в водах исследуемой акватории снижается.

Из рис. 4.34 – 4.41 видно, что ветровые условия и формируемая ими циркуляция вод определяют пространственно-временную изменчивость степени и масштабов влияния береговых антропогенных источников на показатели трофности вод акватории Одесского района СЗЧМ.

С целью оценки экологической эффективности проекта удаления выпуска сточных вод СБО «Северная» на 4 км от берега, с помощью модели эвтрофикации были выполнены расчеты пространственно-временной изменчивости химико-биологических характеристик трофности вод Одесского района СЗЧМ – переменных модели, при гидрометеорологических условиях августа 1983 и 1986 г. для вариантов современного и проектируемого выпуска. Для рассчитанных на один и тот же момент времени (при обоих вариантах выпуска сточных вод) полей моделируемых характеристик, с помощью формулы (4.57), определялись относительные изменения концентраций в каждой точке расчетной области:

$$\eta_{i,j} = \left(1 - C_{i,j}^{\text{П}} / C_{i,j}^{\text{М}}\right) \cdot 100\% , \quad (4.57)$$

где $\eta_{i,j}$ – изменение (в %) концентрации моделируемой переменной в каждой расчетной точке акватории при введении в эксплуатацию удаленного морского выпуска сточных вод СБО «Северная» в сравнении существующим прибрежным вариантом сброса;

$C_{i,j}^M$ – концентрация моделируемой переменной в узле (i, j) расчетной сетки при удаленном морском выпуске сточных вод;

$C_{i,j}^П$ – концентрация моделируемой переменной в том же узле сетки при существующем прибрежном варианте сброса.

Для оценивания ожидаемых изменений уровня трофности вод Одесского района СЗЧМ наиболее информативными являются оценки изменений биомассы фитопланктона и лабильного косного органического вещества (по величине БПК₅). Расчеты показали (рис. 4.42), что удаление выпуска сточных вод СБО «Северная» на 4 км от берега будет способствовать уменьшению концентрации органического вещества в прибрежных водах на 10 – 15 %. Однако, при доминировании ветров определенных направлений, о которых говорилось в разделе 4.2 (например, северных), возможно увеличение концентрации органики на 2 – 5 % в прибрежных водах западной границы района на участке рекреационного побережья г.Одессы.

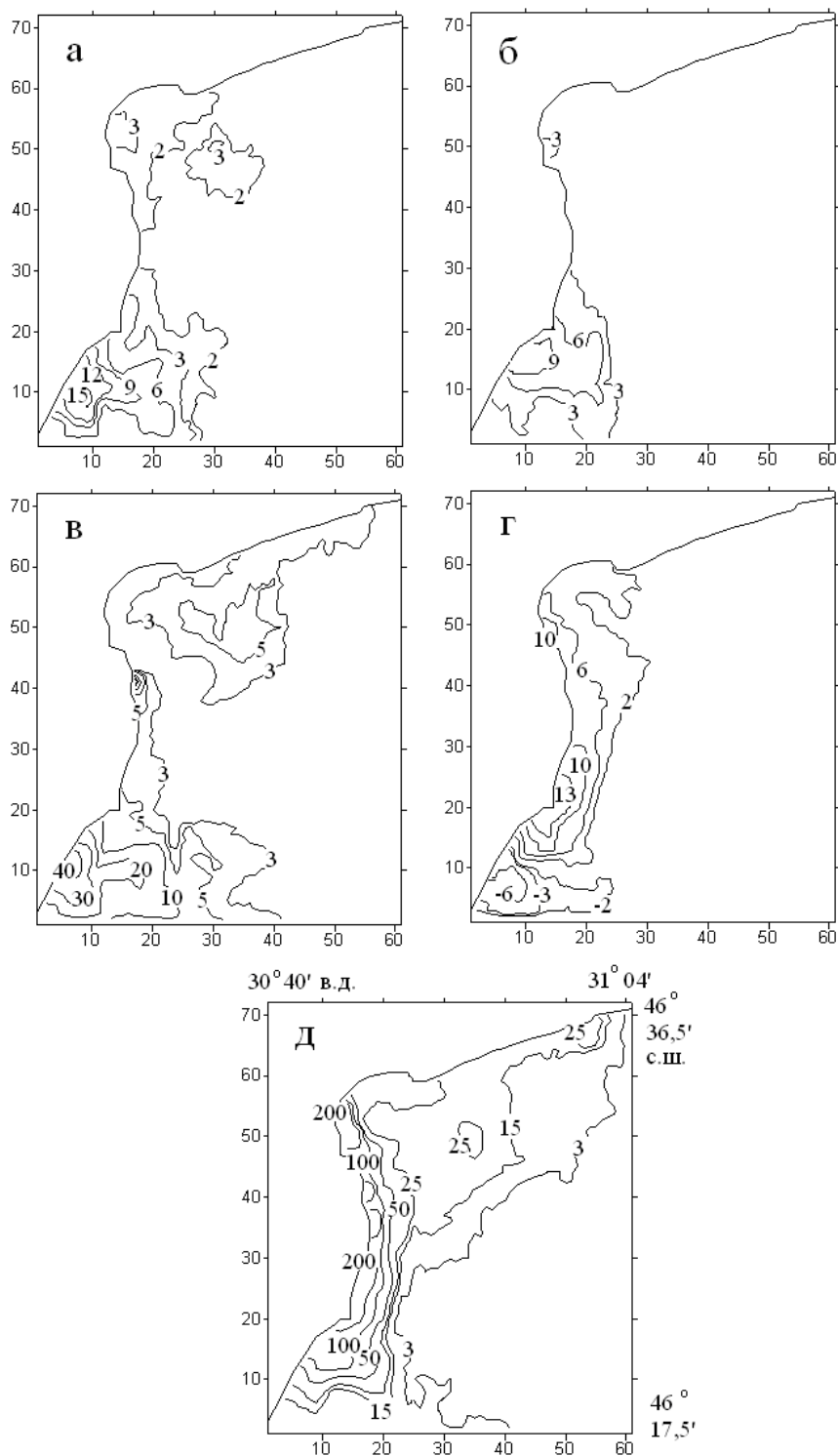


Рис. 4.34 – Вклад (%) береговых антропогенных источников в формирование в фотическом слое Одесского района СЗЧМ: биомассы фитопланктона (а), величины БПК₅ (б), концентраций фосфора фосфатов (в), азота аммония (г), нитратов (д), – *при отсутствии выпуска* сточных вод СБО «Северная» в море. Гидрометеорологические условия – аналог августа 1983 г., *15 сутки*.

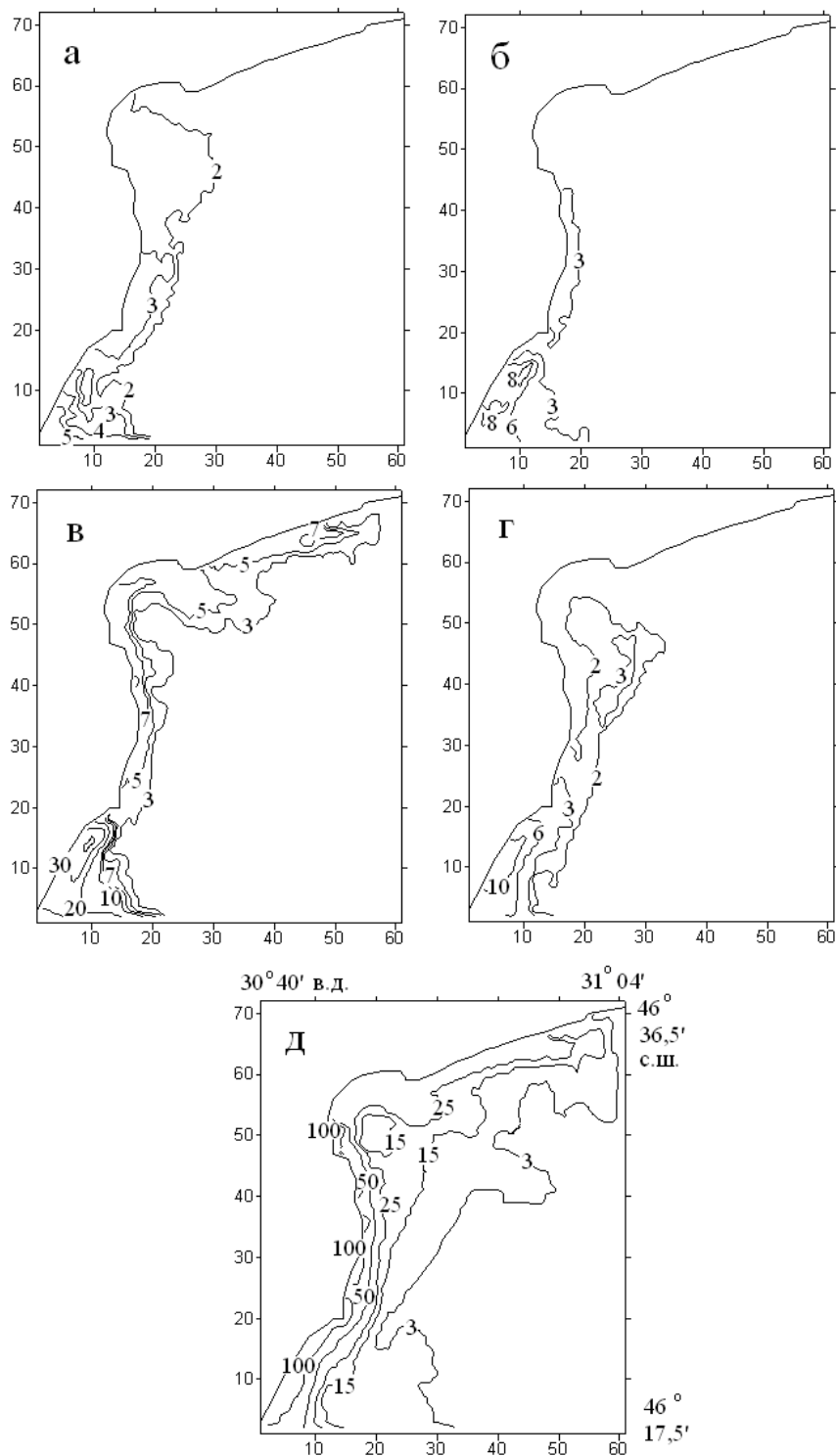


Рис. 4.35 – Вклад (%) береговых антропогенных источников в формирование в фотическом слое Одесского района СЗЧМ: биомассы фитопланктона (а), величины БПК₅ (б), концентраций фосфора фосфатов (в), азота аммония (г), нитратов (д), – *при отсутствии выпуска* сточных вод СБО «Северная» в море. Гидрометеорологические условия – аналог августа 1983 г., **20 сутки**.

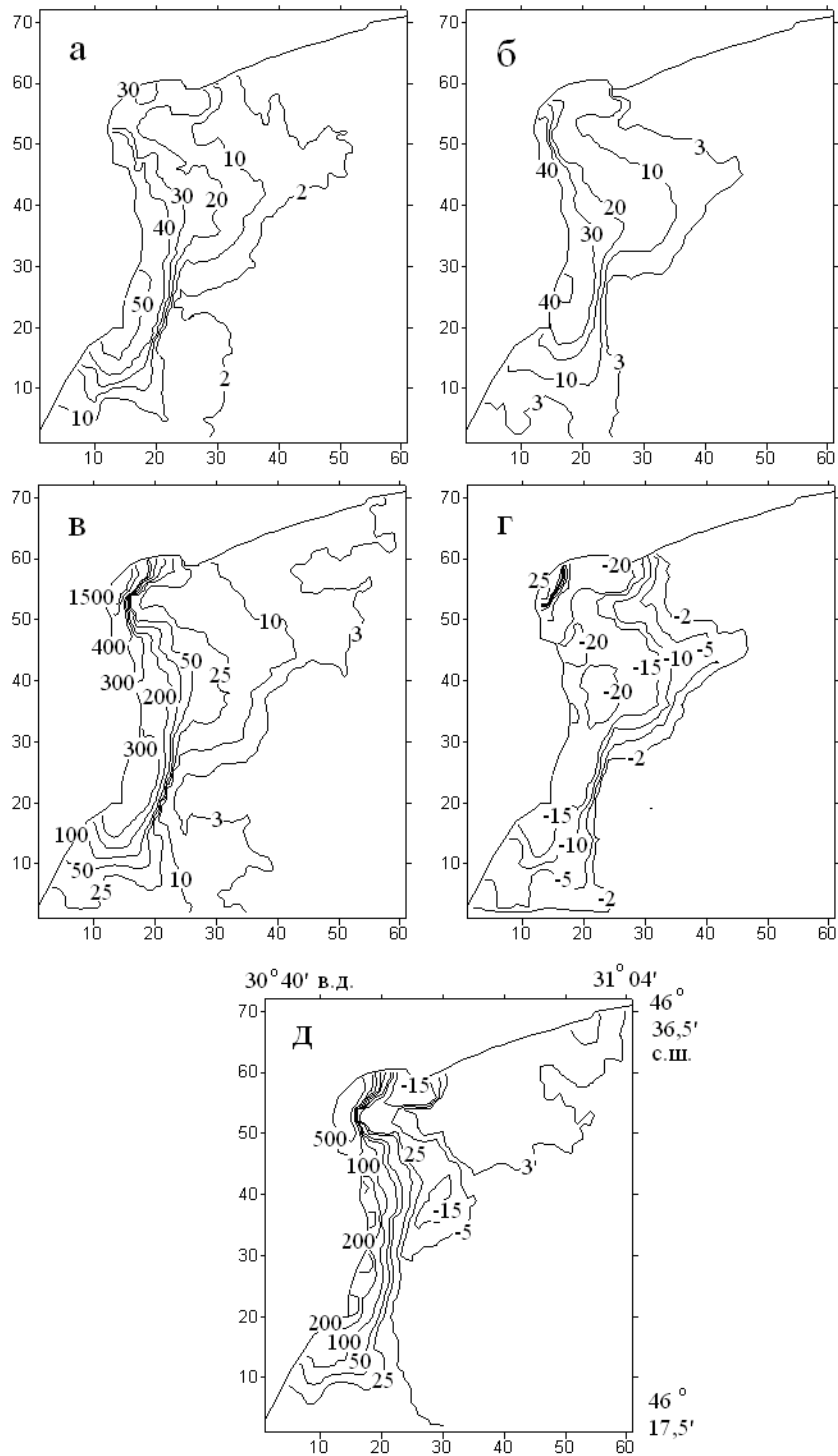


Рис. 4.36 – Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации вклад (%) береговых антропогенных источников в формирование в фотическом слое Одесского района СЗЧМ: биомассы фитопланктона (а), величины БПК₅ (б), концентраций фосфора фосфатов (в), азота аммония (г), нитратов (д), – *при наличии* современного расположения выпуска сточных вод СБО «Северная» в море. Гидрометеорологические условия – аналог августа 1983 г., 15 сутки.

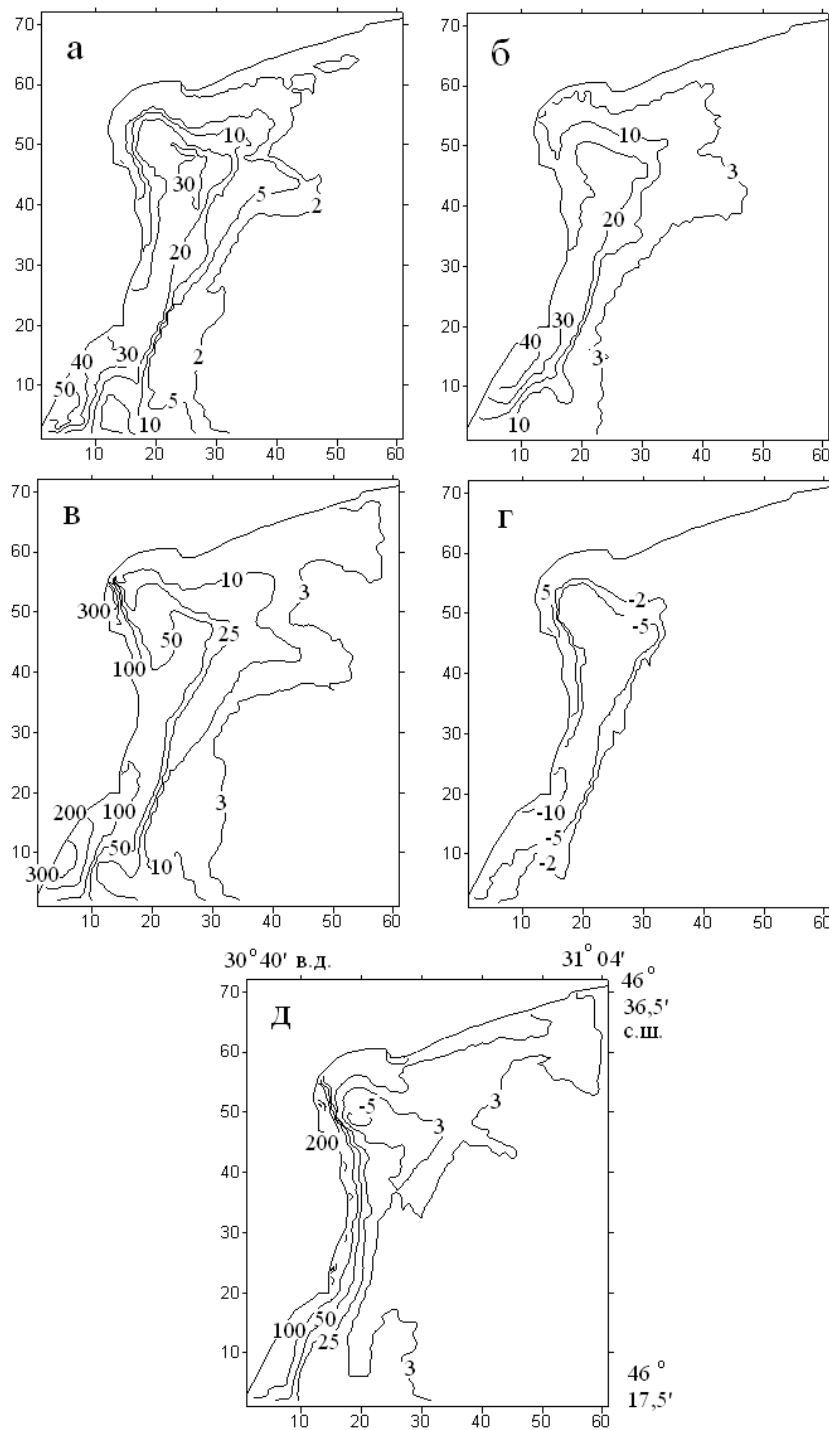


Рис. 4.37 – Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации вклад (%) береговых антропогенных источников в формирование в фотическом слое Одесского района СЗЧМ: биомассы фитопланктона (а), величины BPK_5 (б), концентраций фосфора фосфатов (в), азота аммония (г), нитратов (д), – *при наличии* современного расположения выпуска сточных вод СБО «Северная» в море. Гидрометеорологические условия – аналог августа 1983 г., **20 сутки**.

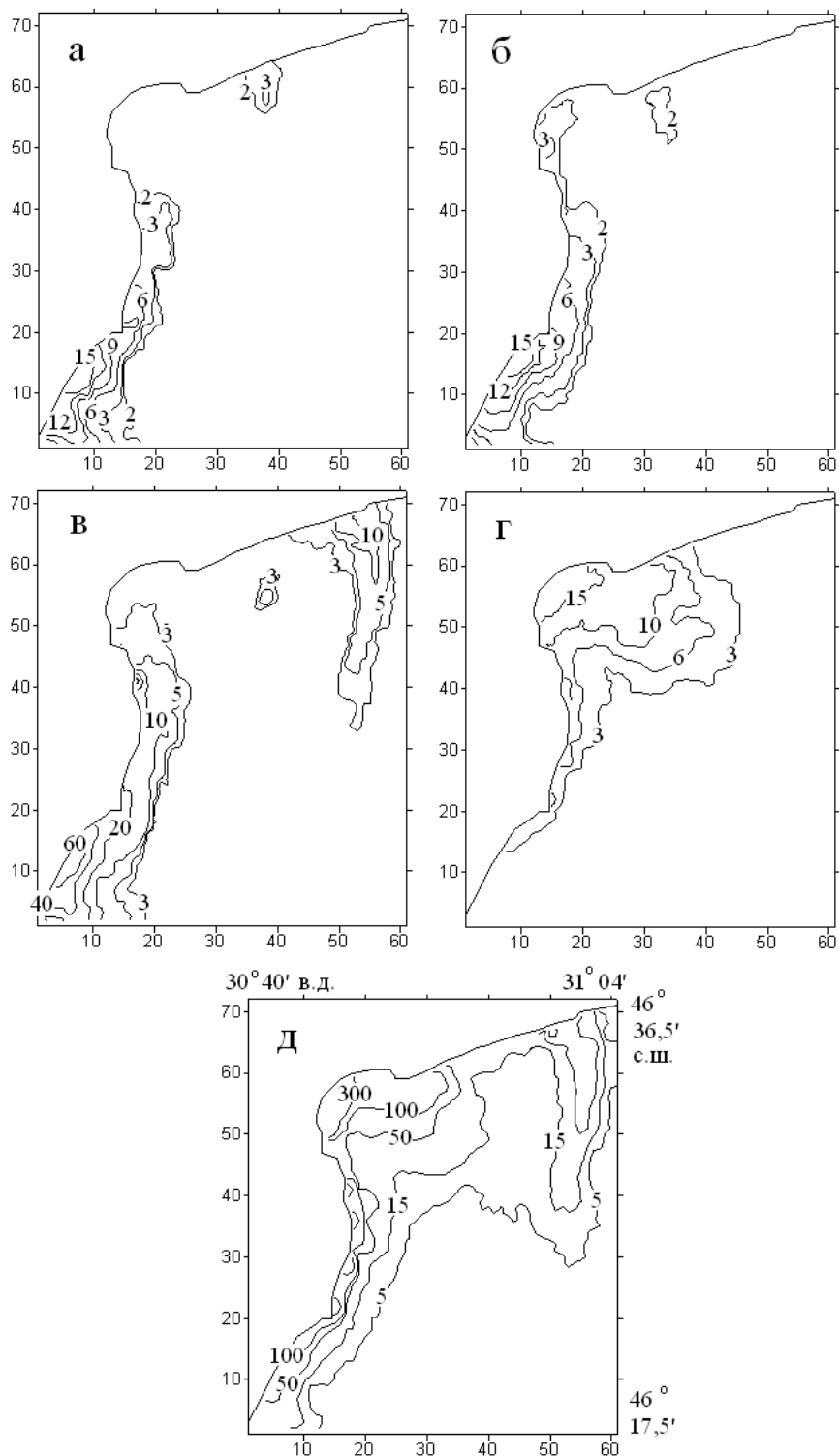


Рис. 4.38 – Вклад (%) береговых антропогенных источников в формирование в фотическом слое Одесского района СЗЧМ: биомассы фитопланктона (а), величины БПК₅ (б), концентраций фосфора фосфатов (в), азота аммония (г), нитратов (д), – *при отсутствии выпуска* сточных вод СБО «Северная» в море. Гидрометеорологические условия – аналог августа 1986 г., *15 сутки*.

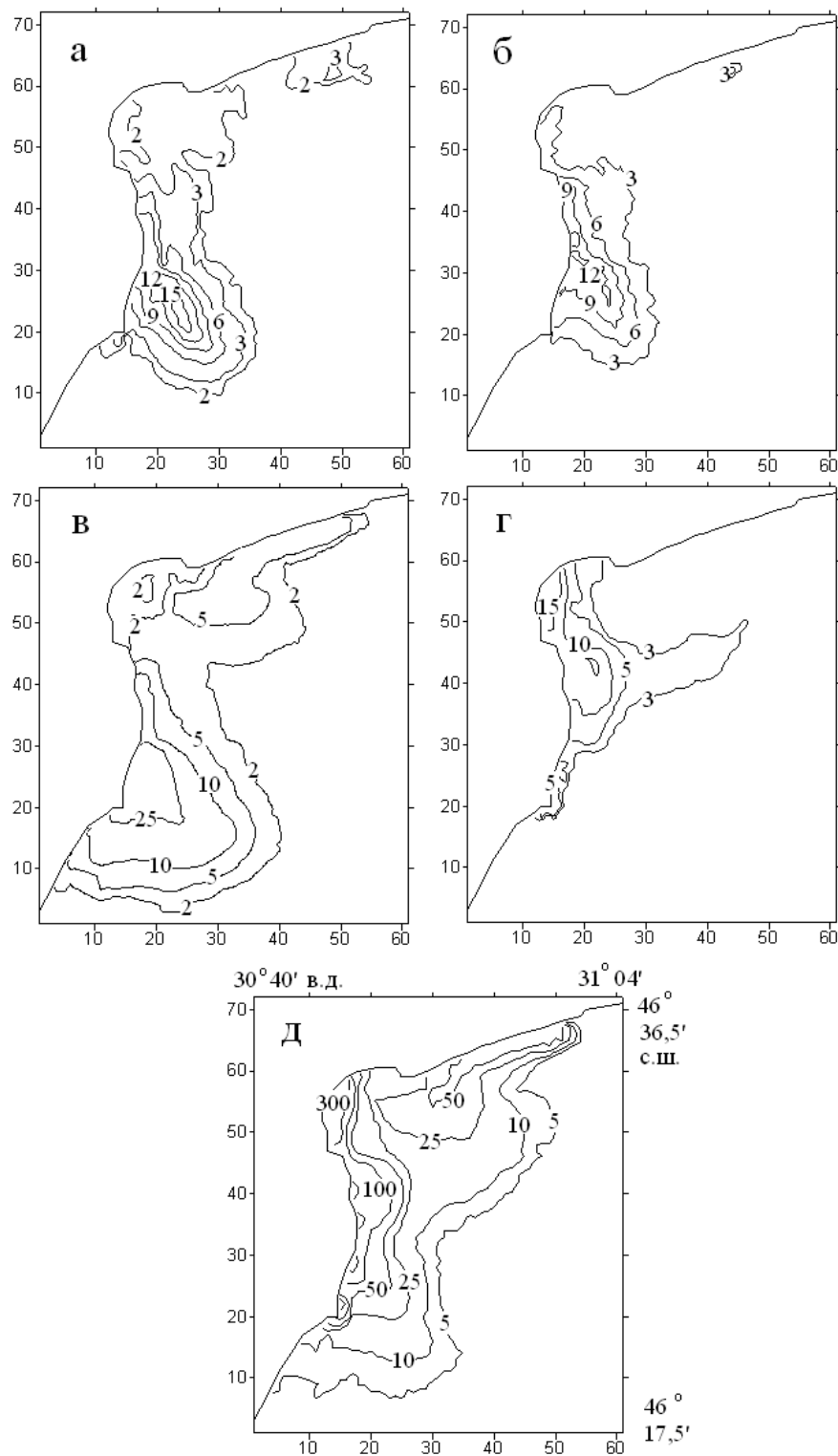


Рис. 4.39 – Вклад (%) береговых антропогенных источников в формирование в фотическом слое Одесского района СЗЧМ: биомассы фитопланктона (а), величины БПК₅ (б), концентраций фосфора фосфатов (в), азота аммония (г), нитратов (д), – *при отсутствии выпуска* сточных вод СБО «Северная» в море. Гидрометеорологические условия – аналог августа 1986 г., **20 сутки**.

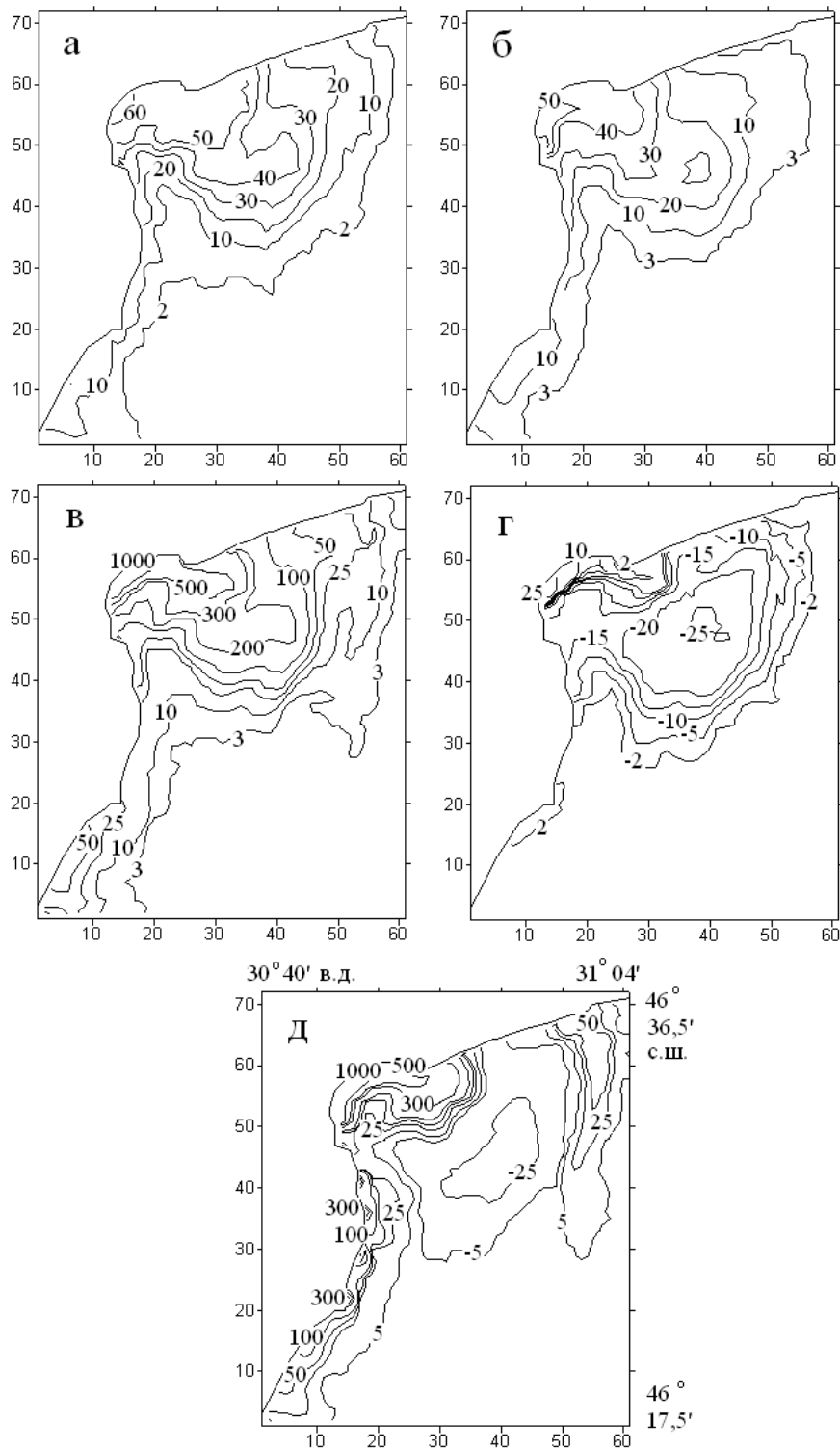


Рис. 4.40 – Вклад (%) береговых антропогенных источников в формирование в фотическом слое Одесского района СЗЧМ: биомассы фитопланктона (а), величины БПК₅ (б), концентраций фосфора фосфатов (в), азота аммония (г), нитратов (д), – *при наличии* современного расположения выпуска сточных вод СБО «Северная» в море. Гидрометеорологические условия – аналог августа 1986 г., *15 сутки*.

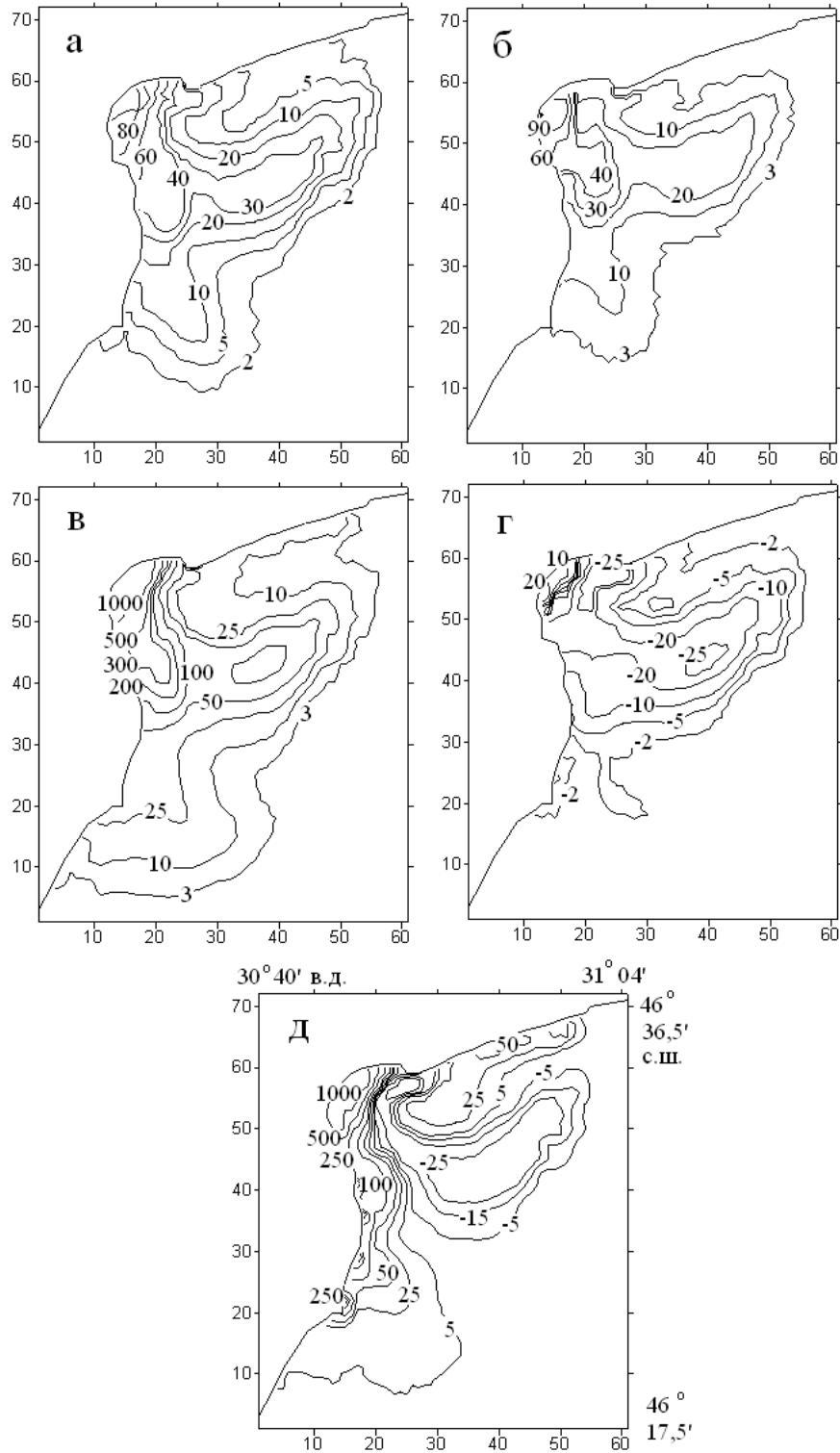


Рис. 4.41 – Вклад (%) береговых антропогенных источников в формирование в фотическом слое Одесского района СЗЧМ: биомассы фитопланктона (а), концентраций фосфора фосфатов (б), азота аммония (в), нитратов (г), величины БПК₅ (д), – *при наличии* современного расположения выпуска сточных вод СБО «Северная» в море. Гидрометеорологические условия – аналог августа 1986 г., **20 сутки**.

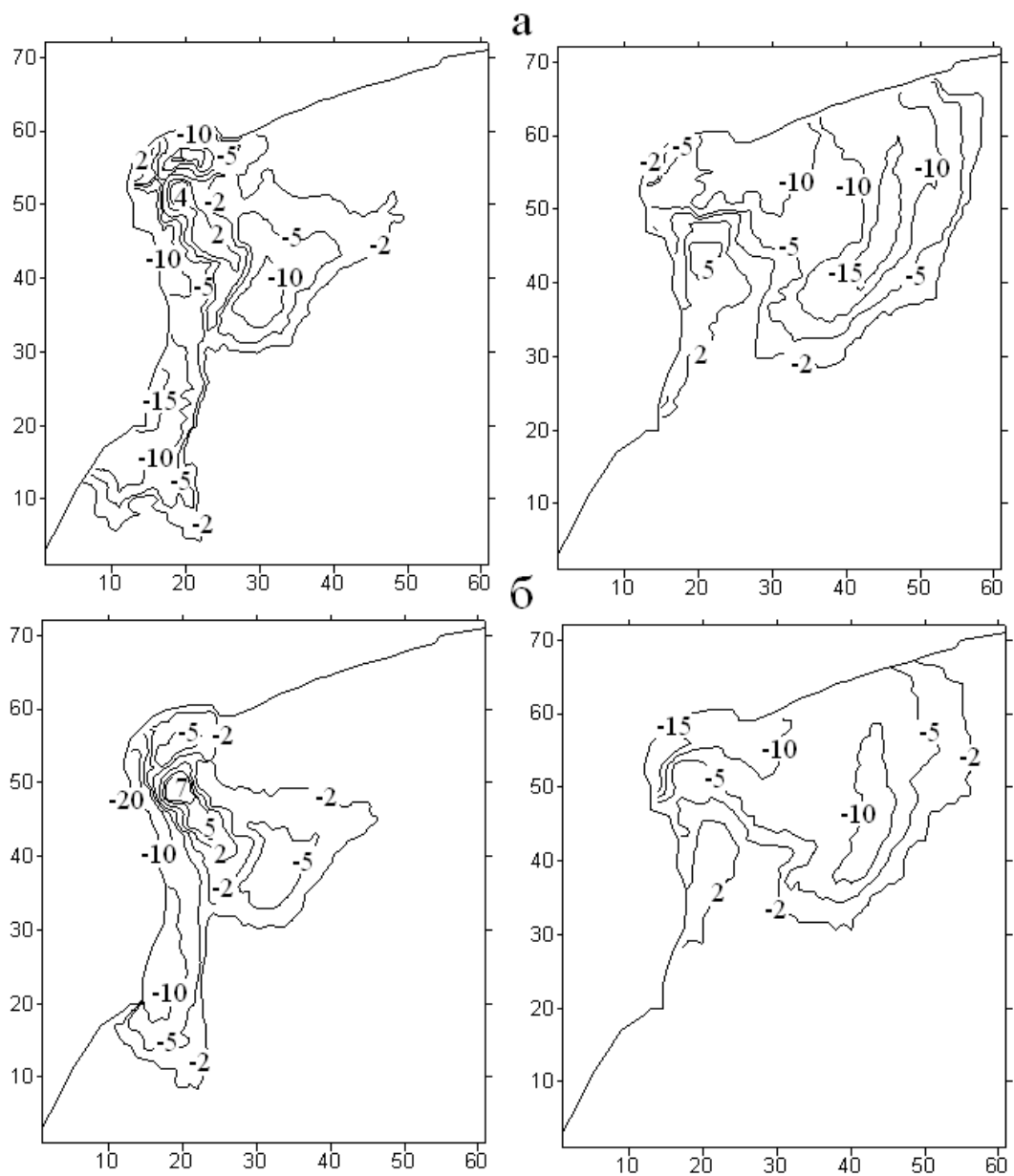


Рис. 4.42 – Изменение, в %, биомассы фитопланктона (а) и величины БПК₅ (б) в поверхностном слое при удалении выпуска сточных вод СБО «Северная» в море на 4 км. Гидрометеорологические условия – аналог августа 1983 (слева) и 1986 (справа) годов, **15 сутки**.

4.4 Влияние ливневого стока на качество вод Одесского района

Как отмечалось в главе 2, к числу значимых береговых источников загрязнения прибрежной зоны г. Одессы относятся ливневые стоки, характерная особенность которых – их эпизодичность и интенсивность. В летний период органами санитарно-эпидемиологической службы периодически запрещается морское водопользование на многих городских пляжах, что в большинстве случаев связано с поступлением ливневых вод с территории города через основные ливневыпуски.

Несомненный интерес представляют оценки уровня и пространственно-временных масштабов загрязнения прибрежной рекреационной зоны моря ливневыми стоками в период выпадения интенсивных осадков в летний период года. Для решения этой задачи использовалась численная математическая модель с блоком самоочищения морских вод (см. раздел 4.1) [60, 68].

Модельные расчеты проводились для трех видов загрязняющих веществ: нефтепродукты, СПАВ и микроорганизмы группы кишечной палочки, концентрация которых в ливневых стоках наиболее высока по сравнению с ПДК (см. табл. 2.12) [60, 70]. Исследуемая акватория Одесского района СЗЧМ ($46^{\circ} 22,4' - 46^{\circ} 33,6'$ с.ш.; $30^{\circ} 44,6' - 30^{\circ} 50,8'$ в.д.), включающая в себя участок Одесского побережья от 16 ст. Большого Фонтана до Крыжановки, покрывалась расчетной сеткой 31×80 узлов с горизонтальным пространственным шагом 250 м. Расчеты выполнялись для 10 уровней по глубине в σ -системе координат. Расходы ливневых стоков определялись для ливня прошедшего 14 – 15 сентября 2003 г. За указанный период в сумме выпало 52 мм осадков, общая продолжительность дождя составила 24 часа. Рассчитанные по формуле (2.1) расходы поверхностного стока составили: для Южного района канализования $12,84 \text{ м}^3/\text{с}$, для Северного – $22,85 \text{ м}^3/\text{с}$, из которых, за счет превышения пропускной способности СБО, без очистки в море поступает $18,23 \text{ м}^3/\text{с}$. Расчетные расходы ливневых вод, поступающих в акваторию моря, через основные ливневыпуски представлены в табл. 4.4. Концентрации загрязняющих веществ в ливневом стоке, использованные в модельных расчетах, приведены в главе 2.

Модельные расчеты распространения и трансформации загрязняющих веществ в морской среде проводились при стационарных северо-западных (сгонных) и юго-восточных (нагонных) ветрах силой 5 и 10 м/с. Фоновые значения концентраций загрязняющих веществ в водах исследуемой акватории не учитывались. Для учета влияния сезонного пикноклина на вертикальную диффузию загрязняющих веществ, задавалось вертикальное

распределение температуры и солености воды, характерное для летнего периода (см. рис. 4.3).

Таблица 4.4 – Расходы ливневых вод, поступающих в море через основные ливневыхпуски

| Ливневыхпуск | Расход ливневых вод, м ³ /с | |
|-----------------------------|--|---------------|
| | 14.09.2003 г. | 15.09.2003 г. |
| 16 ст. Б.Фонтана | 1,56 | 2,72 |
| 10 ст. Б.Фонтана | 1,56 | 2,72 |
| Аркадиевский | 1,56 | 2,72 |
| Девалановский | 0,96 | 1,94 |
| Платоновский | 0,98 | 1,97 |
| Военный | 0,87 | 1,75 |
| Андросовский | 0,87 | 1,75 |
| 1-й и 2-й Заливные переулки | 2,36 | 4,75 |

При расчетах учитывалось самоочищение морских вод от рассматриваемых видов загрязняющих веществ в результате процессов их химико-биологической и физико-химической трансформации. Деструкция и деградация загрязняющих веществ в водной среде описывалась кинетическим уравнением реакции 1-го порядка (4.31).

Коэффициент неконсервативности в уравнении переноса (4.24) для нефтепродуктов определялся на основе приведенных в работе [71] данных экспериментов по определению зависимости периода полураспада растворенных форм нефти τ_{nf} (час.) от температуры воды T_w (°C):

$$\tau_{nf} = 1260.42 - 54.928T_w + 0.5688T_w^2 \quad (4.58)$$

Удельная скорость биodeградации патогенных бактерий, в соответствии с [72], определяется зависимостью вида:

$$K_{coli} = k_n \rho_S^{(S)} \rho_T^{(T_w - 20)}, \quad (4.59)$$

где k_n – скорость гибели *Coliforms* в темноте при температуре воды $T_w = 20^\circ\text{C}$ и солености $S = 0$ ‰ принимается равной ≈ 0.033 час⁻¹; $\rho_S = 1.006$, $\rho_T = 1.07$ – основания поправочных коэффициентов на термохалинные условия *in situ*.

Коэффициент неконсервативности для СПАВ в летний период года, в соответствии с [73], полагался равным $0,002 \text{ час}^{-1}$.

Полученные результаты свидетельствуют (рис. 4.43 – 4.46), что ливневые стоки существенно ухудшают качество морских вод в прибрежной рекреационной зоне г. Одессы. В первые несколько суток после выпадения осадков значения колли-индекса и концентрации нефтепродуктов в морской воде, на большей части побережья, превышают ПДК даже без учета фонового уровня загрязнения. Однако, благодаря высоким скоростям деструкции загрязняющих веществ в летний период года и кратковременности сброса ливневых вод, в течение 4 – 6 суток после выпадения интенсивных осадков уровень загрязнения прибрежных вод уменьшается до фоновых значений. Наибольшие концентрации загрязняющих веществ наблюдаются в районе Одесского залива.

Распространению загрязняющих веществ вдоль побережья способствует формируемый под воздействием ветра вдольбереговой поток. Направление обтекания потоком береговой черты Одесского региона определяется направлением ветра (см. раздел 4.2). Уровень и масштабы загрязнения вод прибрежной зоны зависят от скорости и направления ветра. Так, при скорости ветра 10 м/с площадь распространения высоких концентраций загрязняющих веществ больше, а самоочищение морской среды проходит быстрее, чем при скорости ветра в 5 м/с.

Моделирование загрязнения вод прибрежной зоны СПАВ, поступающими с ливневым стоком, показало (рис. 4.47 – 4.48), что в отличие от предыдущих случаев, прибавка к фоновому уровню загрязнения морских вод исследуемой акватории не превысит 30 % от ПДК при ветре силой 5 м/с и 10 % – при ветре силой 10 м/с. Объясняется это тем, что концентрация СПАВ в сточных водах лишь в 5 раз превышает ПДК, в то время как для колли-индекса и нефтепродуктов эти величины отличаются на несколько порядков.

Высокое содержание в ливневых стоках биогенных веществ, несомненно, приведет к усилению эвтрофикации вод прибрежной зоны исследуемой акватории. Для оценки степени влияния ливневых стоков на интенсивность первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном в результате дополнительного эвтрофирования вод акватории ливневыми стоками в летний период года использовалась модель, включающая в себя уравнения переноса (4.24) для концентраций азота аммония C_{NH_4} и нитратов C_{NO_3} , фосфатов C_{PO_4} , органических форм азота C_{DON} и фосфора C_{DOP} , функции неконсервативности которых для каждой локальной точки пространства записывались в виде следующей системы [70]:

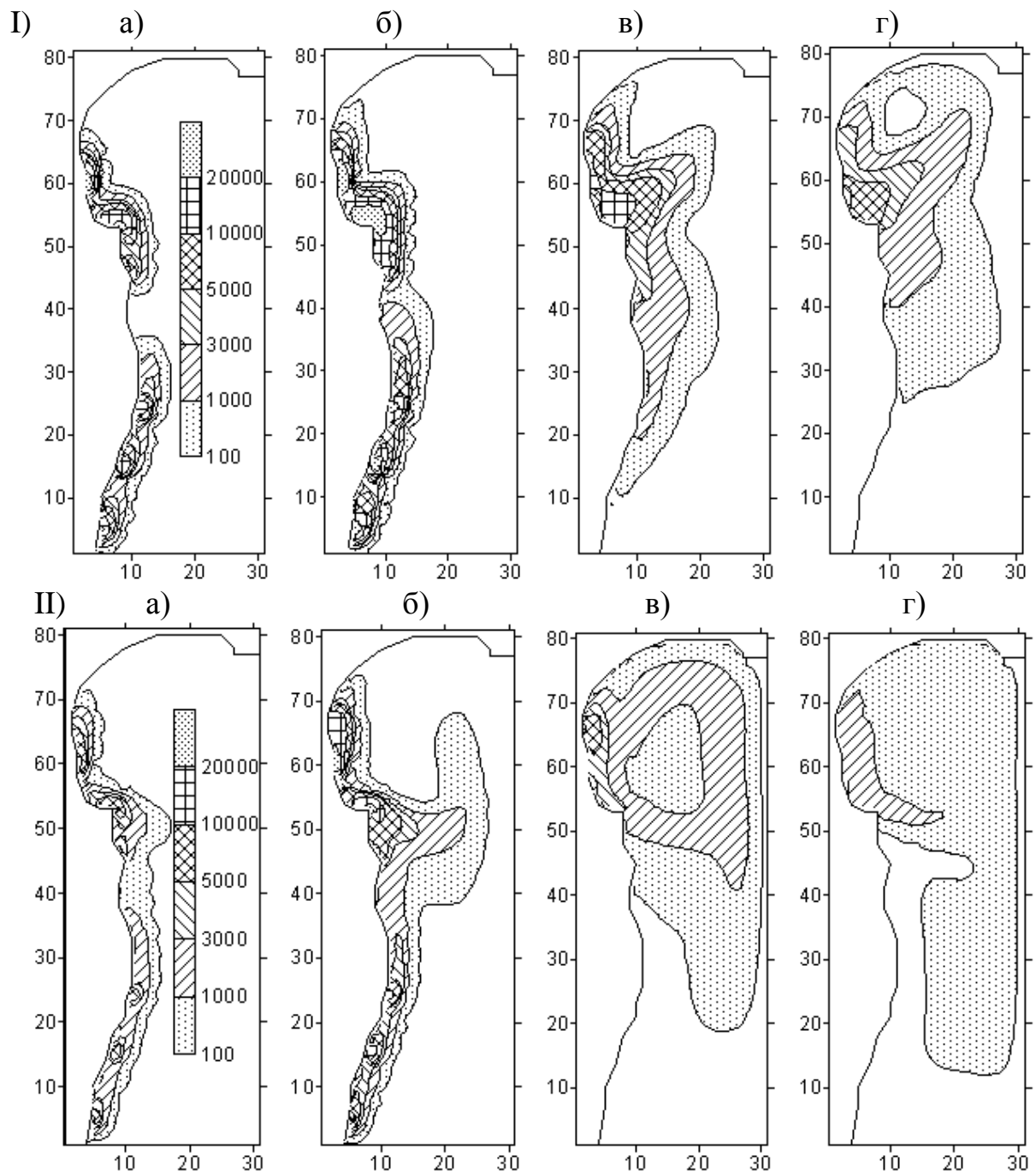


Рис. 4.43 – Рассчитанные по модели самоочищения превышения фоновых концентраций *колли-индекса* (кл/дм³) через 3 суток после начала (и 1,5 суток после окончания) (а), 3,5 суток (б), 4 суток (в) и 5 суток (г) после начала стока ливневых вод в прибрежную зону моря, при *юго-восточном* направлении ветра со скоростью 5 м/с (I) и 10 м/с (II).

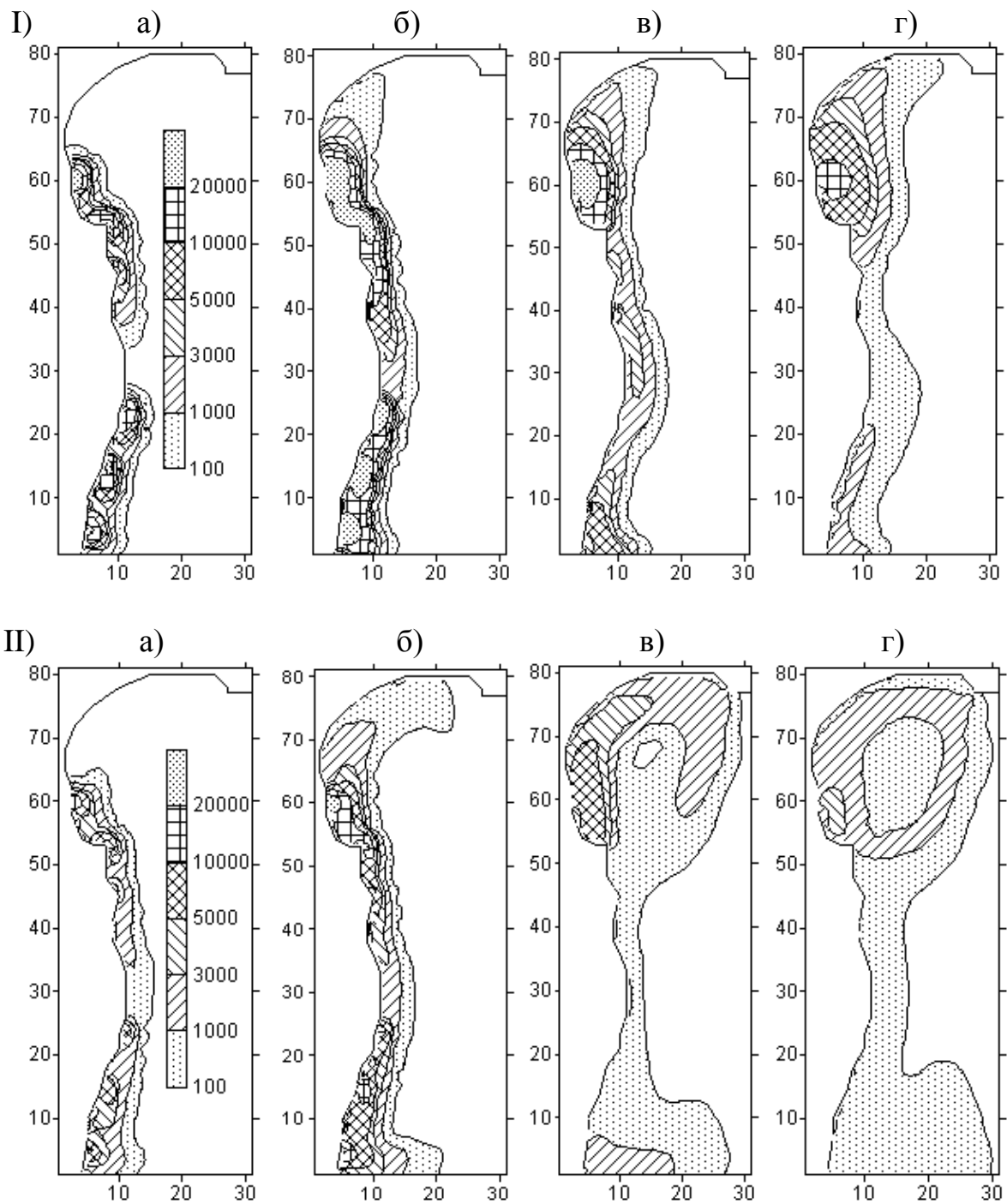


Рис. 4.44 – Рассчитанные по модели самоочищения превышения фоновых концентраций *колли-индекса* (кл/дм³) через 3 суток после начала (и 1,5 суток после окончания) (а), 3,5 суток (б), 4 суток (в) и 5 суток (г) после начала стока ливневых вод в прибрежную зону моря, при *северо-западном* направлении ветра со скоростью 5 м/с (I) и 10 м/с (II).

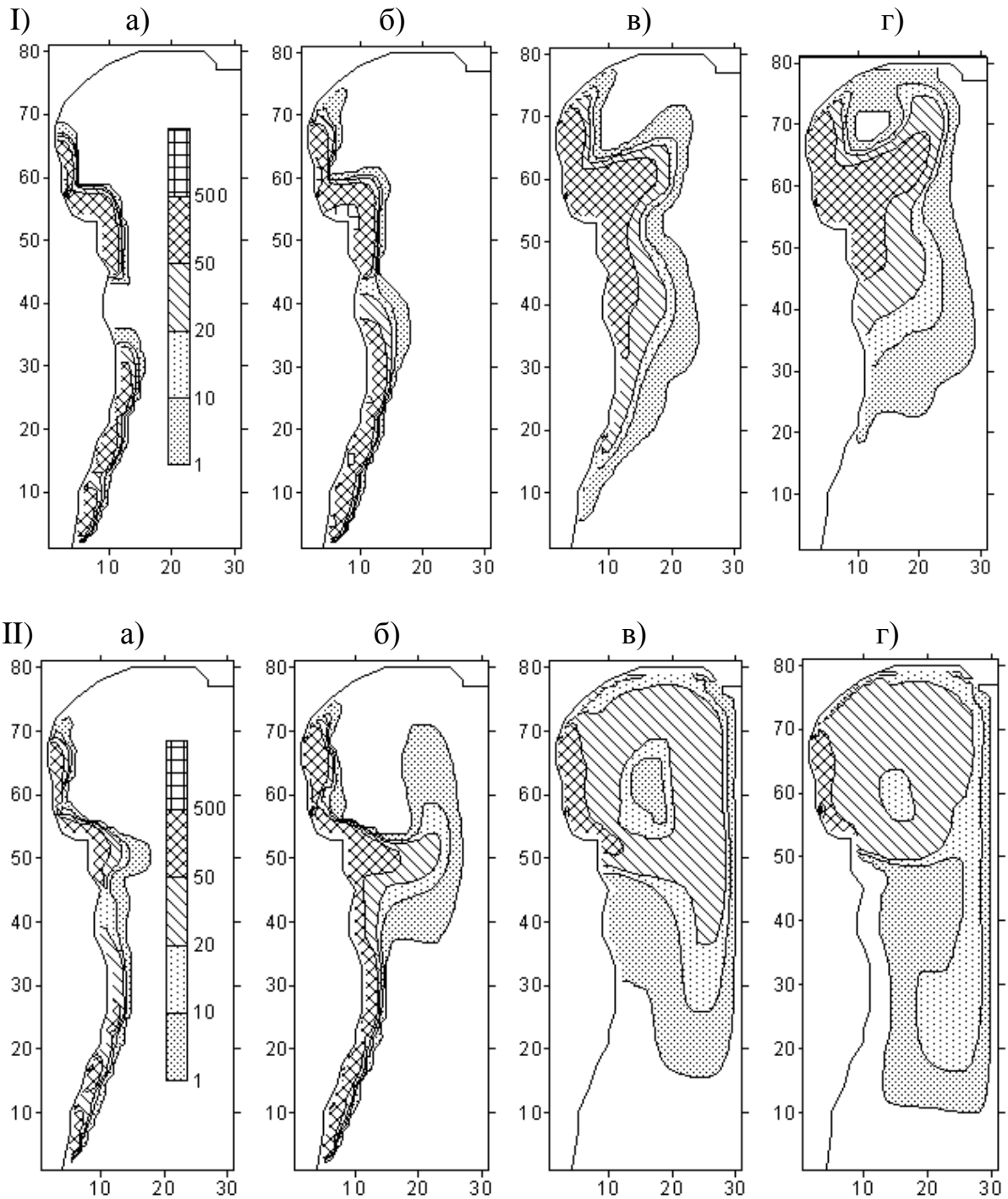


Рис. 4.45 – Рассчитанные по модели самоочищения превышения фоновых концентраций *нефтепродуктов* ($\text{мкг}/\text{дм}^3$) через 3 суток после начала (и 1,5 суток после окончания) (а), 3,5 суток (б), 4 суток (в) и 5 суток (г) после начала стока ливневых вод в прибрежную зону моря, при *юго-восточном* направлении ветра со скоростью 5 м/с (I) и 10 м/с (II).

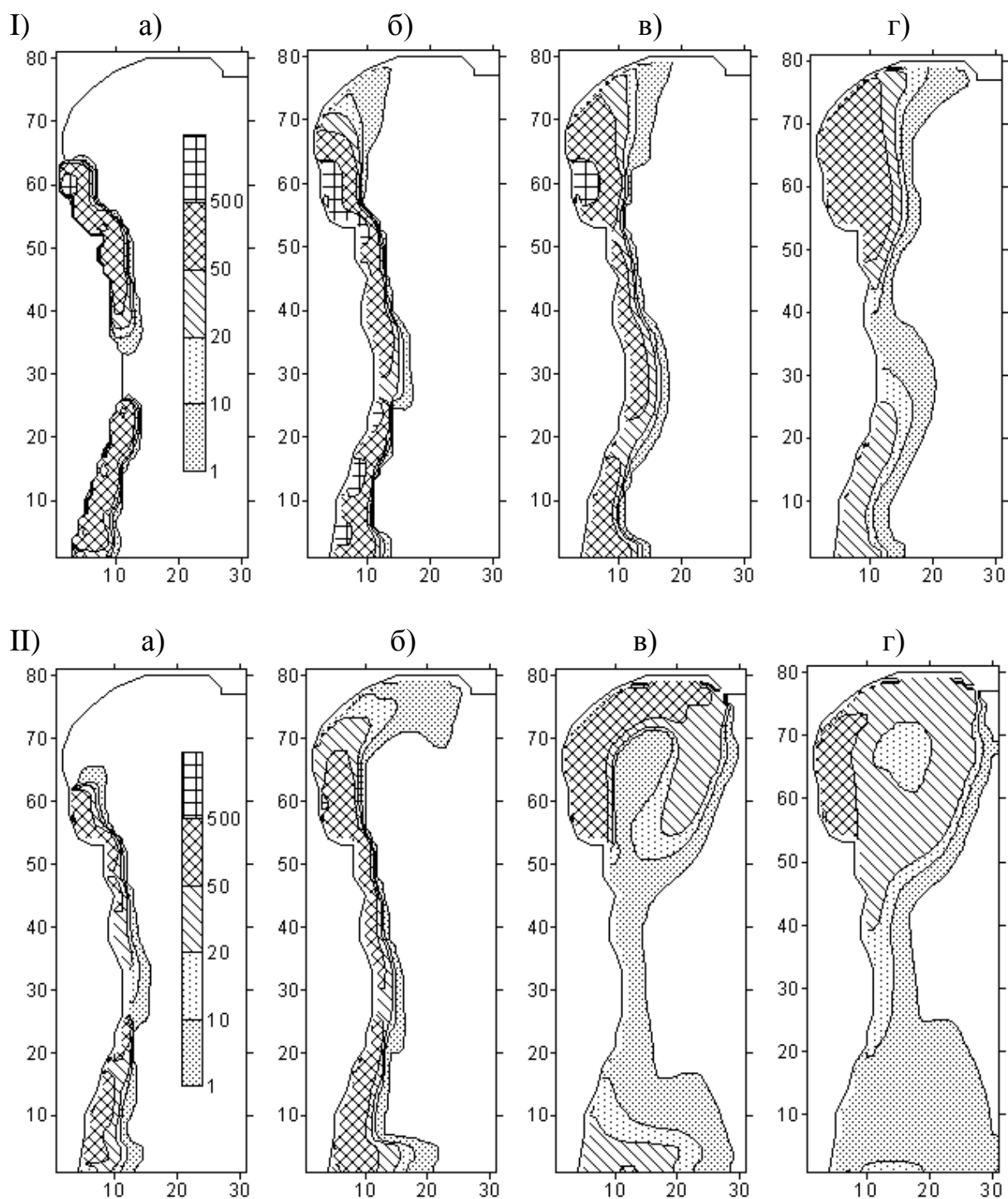


Рис. 4.46 – Рассчитанные по модели самоочищения превышения фоновых концентраций *нефтепродуктов* (мкг/дм^3) через 3 суток после начала (и 1,5 суток после окончания) (а), 3,5 суток (б), 4 суток (в) и 5 суток (г) после начала стока ливневых вод в прибрежную зону моря, при *северо-западном* направлении ветра со скоростью 5 м/с (I) и 10 м/с (II).

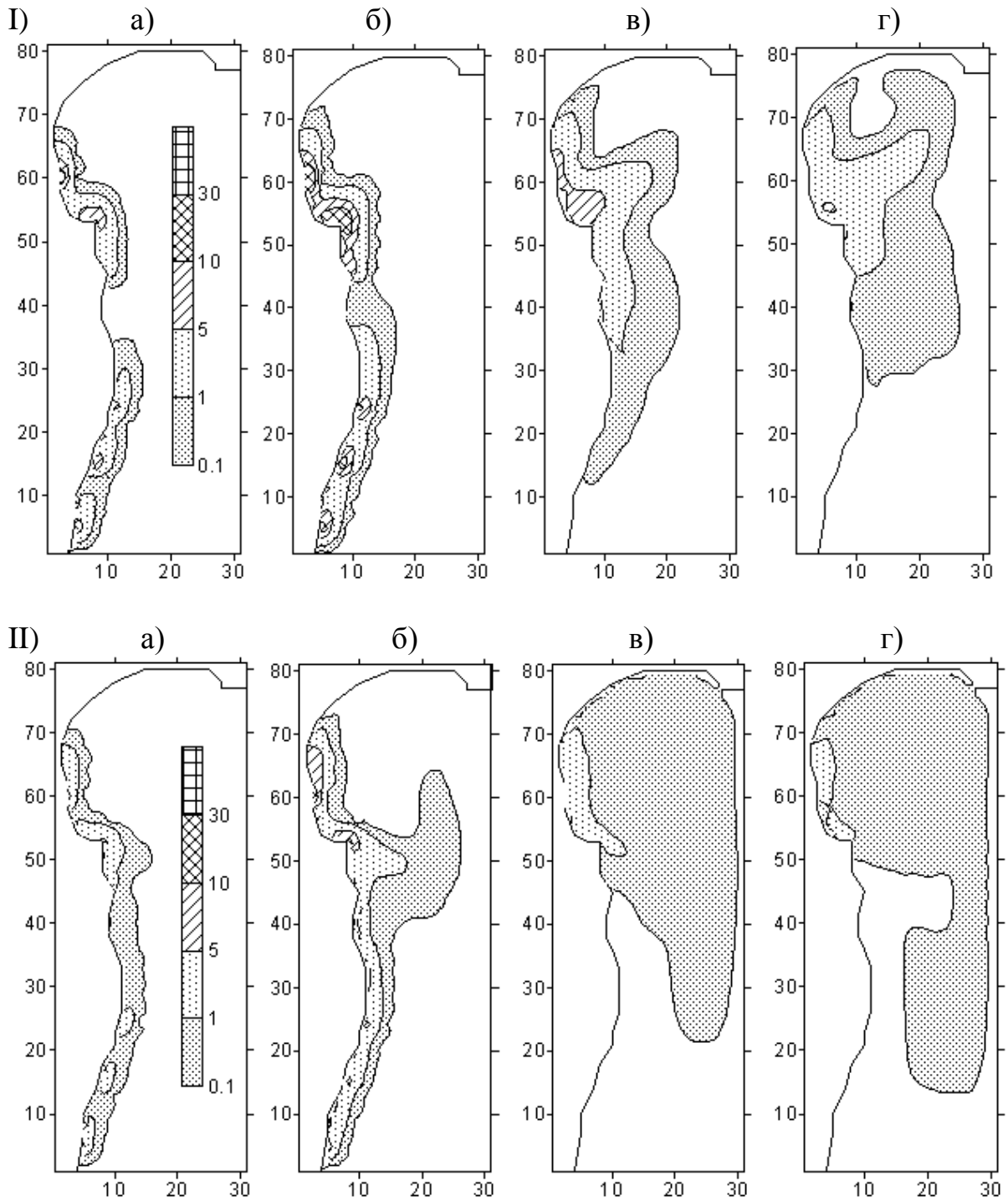


Рис. 4.47 – Рассчитанные по модели самоочищения превышения фоновых концентраций **СПАВ** (мкг/дм^3) через 3 суток после начала (и 1,5 суток после окончания) (а), 3,5 суток (б), 4 суток (в) и 5 суток (г) после начала стока ливневых вод в прибрежную зону моря, при **юго-восточном** направлении ветра со скоростью 5 м/с (I) и 10 м/с (II).

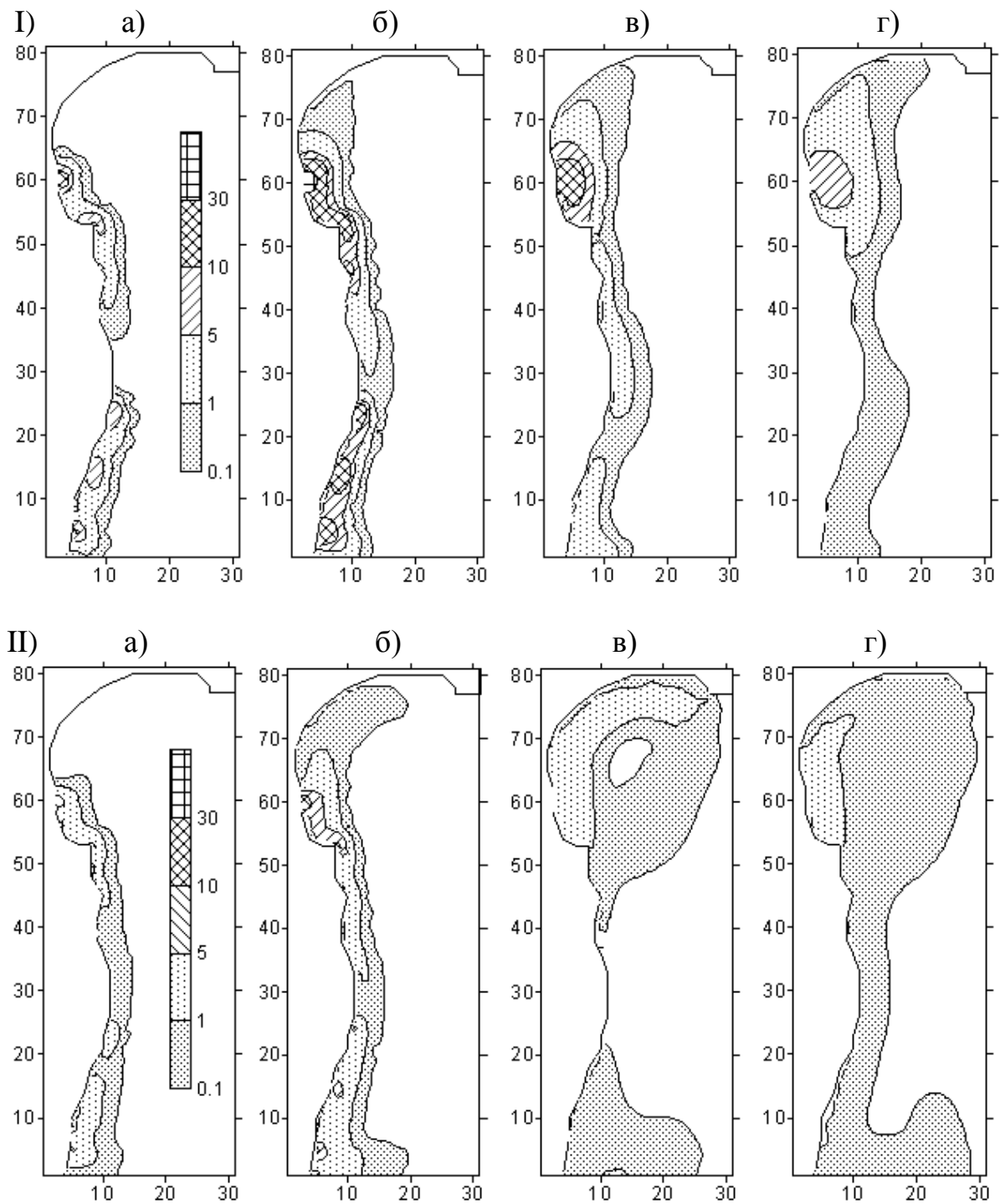


Рис. 4.48 – Рассчитанные по модели самоочищения превышения фоновых концентраций **СПАВ** (мкг/дм^3) через 3 суток после начала (и 1,5 суток после окончания) (а), 3,5 суток (б), 4 суток (в) и 5 суток (г) после начала стока ливневых вод в прибрежную зону моря, при *северо-западном* направлении ветра силой 5 м/с (I) и 10 м/с (II).

$$\left. \frac{dC_{PO4}}{dt} \right|_{local} = K_{PO4} C_{DOP}, \quad \left. \frac{dC_{DOP}}{dt} \right|_{local} = -K_{PO4} C_{DOP}, \quad (4.60)$$

$$\left. \frac{dC_{NH4}}{dt} \right|_{local} = K_{NH4} C_{DON}, \quad \left. \frac{dC_{NO3}}{dt} \right|_{local} = 0, \quad (4.61)$$

$$\left. \frac{dC_{DON}}{dt} \right|_{local} = -K_{NH4} C_{DON}, \quad (4.62)$$

где K_{PO4} – удельная скорость минерализации растворенного органического фосфора, 1/сут; K_{NH4} – удельная скорость минерализации растворенного органического азота, 1/сут.

Валовая суточная продукция фитопланктона в каждой локальной точке пространства, определяемая концентрацией минеральных форм азота и фосфора, оценивалась в соответствии с законом Михаэлиса-Ментен:

$$P_f|_{local} = V_f^{max} f_I(I) f_c(C_N, C_{PO4}) B_f, \quad (4.63)$$

$$f_I(I) = \frac{1}{\Delta z} \int_{z_i}^{z_{i+1}} f_z(I_z) dz = \frac{2.718 f_d}{\Delta z \alpha} \left[\exp(-R_{z_i}) - \exp(-R_{z_{i+1}}) \right] \quad (4.64)$$

$$R_0 = \frac{I_a}{I_{opt}}, \quad R_{z_i} = R_0 \exp(-\alpha z_i), \quad \Delta z = z_{i+1} - z_i \quad (4.65)$$

$$f_z(I_z) = \frac{I_z}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I_z}{I_{opt}}\right), \quad I_z = I_a \exp(-\alpha z). \quad (4.66)$$

$$f_c(C_N, C_{PO4}) = \min \left\{ \frac{C_N + C_N^\phi}{\Pi_N + C_N + C_N^\phi}, \frac{C_{PO4} + C_{PO4}^\phi}{\Pi_{PO4} + C_{PO4} + C_{PO4}^\phi} \right\}, \quad (4.67)$$

$$C_N = C_{NH4} + C_{NO3}, \quad C_N^\phi = C_{NH4}^\phi + C_{NO3}^\phi, \quad (4.68)$$

где B_f – биомасса фитопланктона, гС/м³,

V_f^{max} – максимальная удельная скорость роста фитопланктона, 1/сут;

$C_{PO_4}^{\Phi}$, $C_{NH_4}^{\Phi}$, $C_{NO_3}^{\Phi}$ – фоновое содержание в водах исследуемой акватории фосфора фосфатов, mgP/dm^3 , аммонийной и нитратной форм азота, mgN/dm^3 , соответственно;

C_{PO_4} , C_{NH_4} , C_{NO_3} – содержание в морской воде фосфора фосфатов, mgP/dm^3 , аммонийной и нитратной форм азота, mgN/dm^3 , обусловленное поступлением ливневых стоков;

P_N, P_{PO_4} – константы полунасыщения интенсивности процесса утилизации фитопланктоном минеральных соединений азота и фосфора, соответственно, mgN/dm^3 и mgP/dm^3 ;

I_a – средний за световой день поток ФАР, проникающий через поверхность моря, $Вт/м^2$;

f_d – доля светового дня в сутках ($0 \leq f_d \leq 1$);

I_0 – поток фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР), проникающей через поверхность моря, $Вт/м^2$;

I_{opt} – оптимальная для фотосинтеза облученность, $Вт/м^2$;

I_z – облученность на глубине z , $Вт/м^2$;

α – интегральный коэффициент ослабления интенсивности ФАР с глубиной, $1/м$.

Использованные значения параметров уравнений химико-биологической части модели самоочищения вод приведены в табл. 4.5.

Расчеты выполнялись для условий того же ливня, что и в задаче самоочищения морских вод от загрязняющих веществ, описанной ранее.

Таблица 4.5 – Значения параметров химико-биологического блока модели влияния ливневых стоков на продукцию органического вещества фитопланктоном

| Параметр | Значение | Ед. изм. | Параметр | Значение | Ед. изм. |
|-------------------|----------|------------|-----------------|----------|----------|
| V_f^{max} | 2,0 | 1/сут | $K_{NH_4}^{20}$ | 0,06 | 1/сут |
| P_N | 0,050 | mgN/dm^3 | $K_{PO_4}^{20}$ | 0,14 | 1/сут |
| P_{PO_4} | 0,005 | mgP/dm^3 | α | 0,5 | 1/м |
| $C_{PO_4}^{\Phi}$ | 0,007 | mgP/dm^3 | I_{opt} | 65 | $Вт/м^2$ |
| $C_{NH_4}^{\Phi}$ | 0,07 | mgN/dm^3 | f_d | 0,42 | - |
| $C_{NO_3}^{\Phi}$ | 0,02 | mgN/dm^3 | V_f | 0,3 | $гС/м^3$ |

Из рис. 4.49 следует, что в результате поступления биогенных веществ с ливневыми стоками валовая первичная продукция фитопланктона в первые сутки после окончания дождя возрастет в

прибрежной зоне Одесского района от 5 до 45 %. Максимумы роста продукции органического вещества соответствуют местоположению основных ливневыпусков. В течение суток происходит интенсивное разбавление поступающих ливневых вод, в результате чего во вторые сутки влияние ливневых стоков на первичную продукцию фитопланктона (при условии, что поступающие биогенные вещества не были утилизированы фитопланктоном в первые сутки) сказывается лишь в Одесском заливе.

Согласно ст. 70 Водного кодекса Украины, сброс любых сточных вод в водные объекты допускается только при условии наличия нормативов предельно допустимых концентраций и установленных нормативов предельно допустимого сброса загрязняющих веществ. В случае отсутствия установленных норм предельно допустимого сброса, согласно ст. 29 [49], предусматривается возмещение ущерба, причиненного водным объектам.

Поскольку сброс ливневых сточных вод не нормируется, то его можно рассматривать как самовольный сброс возвратных вод, для которых не установлены нормы предельно допустимого сброса вредных веществ. Оценка экономического ущерба, причиненного государству вследствие несанкционированного сброса ливневых стоков в прибрежную зону моря проводилась в соответствии с методикой [74], учитывающей только количество загрязняющих веществ, поступивших за определенный период времени в водный объект.

При определении размера ущерба использовались значения концентраций загрязняющих веществ, приведенные в главе 2. Размер возмещения ущерба причиненного государству вследствие несанкционированного сброса ливневого стока в морскую среду для рассмотренного дождя составил 155,4 тыс. грн.

Для сравнения размеров возмещения ущерба были рассмотрены некоторые случаи выпадения ливневых осадков в 2004 г. Полученные оценки представлены в табл. 4.6.

Как следует из рассмотренных случаев, размер ущерба причиненного государству вследствие несанкционированного сброса ливневого стока в прибрежную зону моря в каждом конкретном случае зависит от продолжительности и интенсивности дождя и составляет от 155,4 до 12,1 тыс. грн.

Однако следует отметить, что все общепринятые методики оценки ущерба, включая использованную в этой работе, не учитывают пространственно-временные масштабы загрязнения акватории моря, которые определяются не только величиной сброса, но и интенсивностью разбавления сточных вод, и, следовательно, являются весьма приближенными.

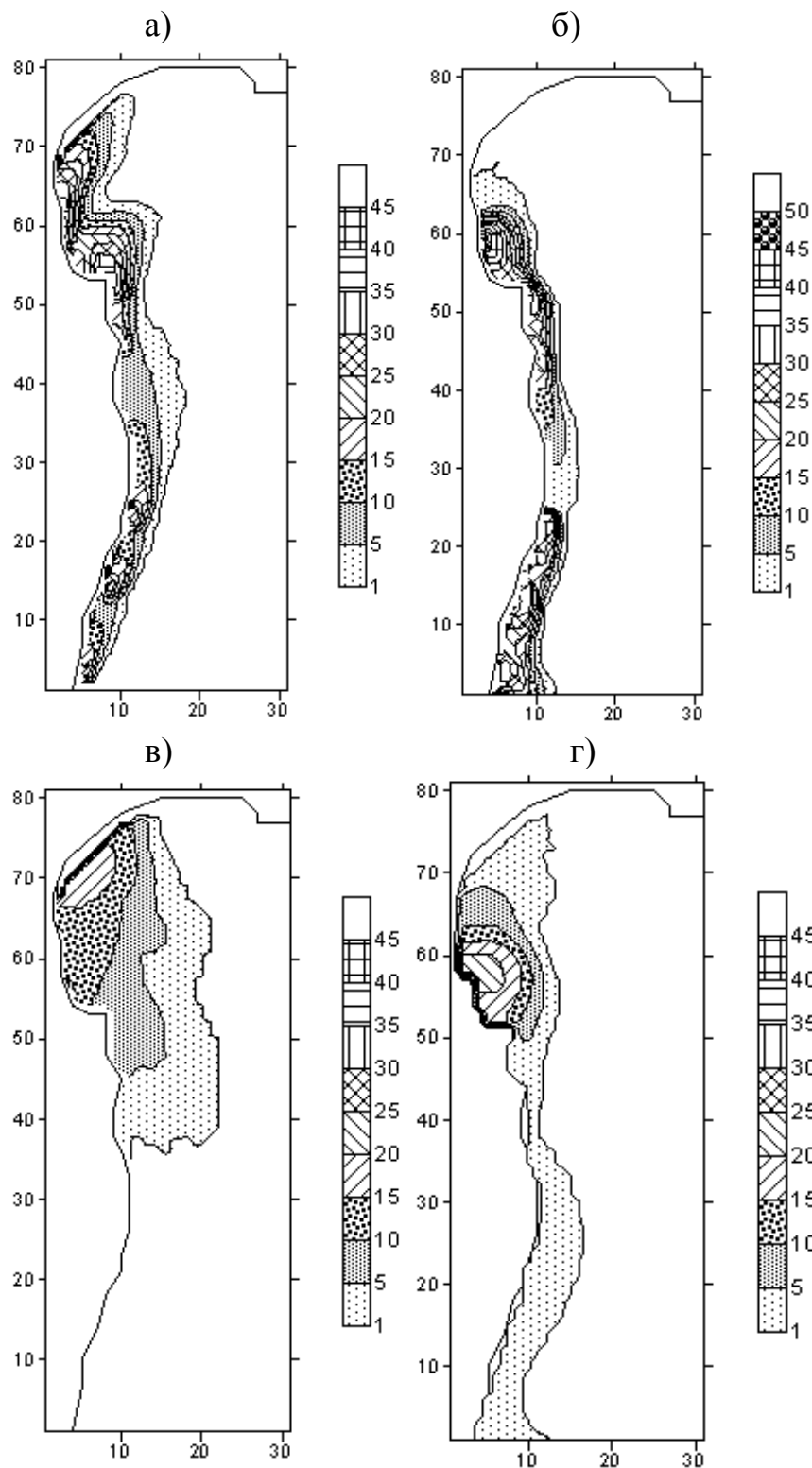


Рис. 4.49 – Относительное изменение (%) суточной валовой первичной продукции фитопланктона при поступлении ливневых стоков в первые (а, б) и вторые (в, г) сутки после дождя при южном (а, в) и северо-западном (б, г) ветрах со скоростью 5 м/с.

Таблица 4.6 – Размер возмещения ущерба причиненного государству вследствие несанкционированного сброса ливневого стока в морскую среду

| Дата выпадения ливневых осадков | Расход ливневого стока, м ³ /с | Продолжительность дождя, час. | Размер возмещения ущерба, тыс. грн. |
|---------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------------|
| 26 июня 2004 г. | 15,88 | 3 час. 40 мин. | 12,1 |
| 10 июля 2004 г. | 34,58 | 3 час. 25 мин. | 24,6 |
| 24 августа 2004 г. | 6,33 | 10 час. 52 мин. | 14,3 |

Для уменьшения влияния ливневых стоков на качество морских вод в прибрежной зоне г.Одессы необходимо всю городскую систему ливневой канализации объединить в отдельный коллектор, который бы имел выпуск в глубоководную часть Одесского района. С целью решения этой задачи еще в конце 80-х годов было начато строительство Южного тоннельного коллектора на участке от Аркадии до СБО «Южная». Однако после строительства 2 км его длины дальнейшая реализация проекта была остановлена из-за отсутствия финансовых средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии обобщена и систематизирована информация о береговых антропогенных источниках загрязнения морской среды Одесского района СЗЧМ, а также определена их роль в формировании качества вод исследуемой акватории. Работа выполнена на основе анализа данных многолетнего экологического мониторинга и результатов численного математического моделирования.

В работе получены следующие научные и практические результаты.

Определено количество загрязняющих веществ, поступающих в акваторию Одесского района СЗЧМ от идентифицированных береговых антропогенных источников загрязнения, а также их относительный вклад в загрязнение морской среды. Установлено, что СБО «Южная» и «Северная» поставляют 39 % нитратов, 80 % нитритов, 93 % аммонийного азота, 92 % фосфатов и 59 % органических веществ от общего их количества, поступающего из береговых антропогенных источников. С ливневыми стоками поступает около 31 % от общего сброса органического вещества и 93 % от сброса нефтепродуктов. Сток дренажных вод – существенный источник нитратного азота (около 22 %). Сточные воды Одесского припортового завода, порта и города Южный поставляют 18 % от общего количества нитратов и более 5 % фосфатов.

На основе анализа данных многолетнего экологического мониторинга вод акватории показано, что в прибрежной зоне моря концентрации биогенных и загрязняющих веществ, как правило, выше, чем в открытой части акватории. Максимальные их концентрации наблюдаются в районах расположения основных береговых источников загрязнения, что свидетельствует о существенном влиянии последних на качество вод Одесского района.

Получены интегральные оценки:

- степени эвтрофирования вод, с использованием индекса эвтрофикации E-TRIX;
- качества вод в целом, с использованием комплексных экологических показателей.

Характерное для района среднегодовое значение индекса составляет 6 и изменяется по сезонам в пределах от 5,8 (весной) до 6,18 (осенью), что позволяет классифицировать уровень трофности вод как переходный между высоким и очень высоким, а качество вод в отношении показателей трофности как плохое. Максимальные значения индекса отмечаются в летне-осенний период года в прибрежной зоне.

Установлено, что экологическое состояние исследуемого района в период мониторинга классифицируется как неустойчивое, а экологическая надежность равна нулю. Наибольший вклад в загрязнение морских вод дают БПК₅, нефтепродукты, медь, цинк. Концентрация нефтепродуктов, БПК, патогенной микрофлоры может превышать ПДК. Максимальная экологическая неустойчивость вод характерна для прибрежных вод летом.

Установлены особенности распространения загрязняющих веществ вдоль побережья района, определяемые ветровыми условиями. При совместном функционировании СБО «Северная» и «Южная» наиболее неблагоприятны для качества прибрежных вод западной границы района ветра СВ, В, ЮВ и З направлений (суммарная повторяемость 51 % в летний период), а для северной границы – Ю, ЮЗ, З и СЗ направлений (суммарная повторяемость 60 % в летний период). Доминирующая роль в формировании повышенного уровня загрязнения вод в прибрежной зоне Одесского района принадлежит СБО «Северная». Влияние СБО «Южная» на качество вод прибрежной зоны наиболее неблагоприятно при З и ЮЗ ветрах, при которых в весенне-летний период года развивается прибрежный апвеллинг.

Функционирование береговых антропогенных источников оказывает значительное влияние на уровень трофности морских вод Одесского района в пределах 5 – 7 км полосы прибрежных вод. При этом максимальные значения вкладов береговых источников в эвтрофикацию вод отмечаются в пределах двухмильной природоохранной прибрежной зоны. Уровень трофности вод в открытой морской части акватории формируется под доминирующим влиянием речного стока Днепра и Южного Буга, хотя при функционировании СБО «Северная» летом возможны гидрометеорологические условия, когда существенное влияние береговых источников распространяется на всю северную часть акватории Одесского района.

Определены возможные пределы уменьшения современного уровня трофности вод акватории путем реализации региональных природоохранных мероприятий, которые определяются вкладом береговых антропогенных источников в формирование уровня трофности морских вод по сравнению с речным стоком Днепра и Южного Буга, интенсивностью внутриэкосистемных продукционно-деструкционных процессов. Показано, что в пределах двухмильной прибрежной природоохранной зоны, путем нормирования сбросов береговых антропогенных источников загрязнения, возможно уменьшить:

- в весенний период – биомассу фитопланктона от 3 до 25 %, концентрацию лабильного косого органического вещества – до 10 %, фосфора фосфатов – от 5 до 80 %;

- в летний период, при отсутствии выпуска сточных вод от СБО «Северная», биомассу фитопланктона, концентрации лабильного косного органического вещества, азота аммонийного – от 3 до 15 %, азота нитратного – от 60 до 500 %, фосфора фосфатов – от 5 до 60 %;
- в летний период, при наличии выпуска сточных вод от СБО «Северная», биомассу фитопланктона, концентрацию лабильного косного органического вещества – от 10 до 80 %, азота нитратного – от 50 % до 1000 %, азота аммонийного – от 5 до 20 %, фосфора фосфатов – от 5 до 1000 %.

Установлено доминирующее негативное влияние сбросов сточных вод СБО «Северная» на формирование качества вод Одесского района СЗЧМ. Особо следует подчеркнуть негативную роль СБО «Северная» как поставщика минерального фосфора – биогенного вещества лимитирующего первичную продукцию в исследуемой акватории. Поступление фосфора фосфатов в морскую среду со сбросными водами СБО «Северная» приводит к росту темпов синтеза органического вещества фитопланктоном. Для ограничения первичной продукции органического вещества рекомендовано в первую очередь уменьшать сбросы фосфорсодержащих биогенных веществ.

При реализации проекта удаления выпуска сточных вод СБО «Северная» на 4 км от берега, концентрации загрязняющих веществ в прибрежной зоне Одесского района уменьшатся при ветрах большинства направлений, за исключением северного и южного. Особенно значительного уменьшения уровня загрязнения вод следует ожидать вдоль северного побережья Одесского залива. При С и Ю ветрах (суммарная повторяемость в летний период 26,5 %) возможно увеличение уровня загрязнения прибрежных вод на участке между мысами Ланжерон и Малый фонтан на 25-100 % по сравнению с современным вариантом сброса. С другой стороны, при ветрах с восточной составляющей (суммарная повторяемость 26,4 %), уровень загрязнения прибрежных вод на этом участке уменьшится в 2-4, а возможно и более раз.

Удаление выпуска сточных вод СБО «Северная» на 4 км от берега будет способствовать уменьшению концентрации органического вещества в прибрежных водах большей части побережья на 10 – 15 %. Однако, при доминировании ветров определенных направлений, возможно увеличение концентрации органики на 2 – 5 % в прибрежных водах западной границы района на участке рекреационного побережья г.Одессы.

Определены пространственно-временные масштабы и степень загрязнения вод акватории ливневыми стоками, получены оценки эколого-экономического ущерба, наносимого сбросом неочищенных ливневых стоков в море. Показано, что влияние ливневых стоков на качество прибрежных морских вод может сохраняться в течение 4 – 6 суток после

выпадения интенсивных осадков, пространственно-временные масштабы загрязнения морской акватории определяются интенсивностью ливня и ветровыми условиями. Валовая первичная продукция фитопланктона в первые сутки после окончания дождя возрастает на 5 – 45 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Загальнодержавна програма охорони та відтворення довкілля Азовського і Чорного морів // Причорноморський екологічний бюлетень. – 2001. - № 2 (грудень) – С. 7–53.
2. Практическая экология морских регионов. Черное море / [Э.Н. Альтман, А.А. Безбородов, Ю.И. Богатова и др.]; под ред. В.П. Кеонджяна, А.М. Кудина, Ю.В. Терехина. – Киев: Наукова думка, 1990. – 252 с.
3. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология / [Зайцев Ю.П., Александров Б.Г., Миничева Г.Г. и др.]; под ред. Ю.П. Зайцева, Б.Г. Александрова, Г.Г. Миничевой. – Киев: Наукова думка. 2006 – 701 с.
4. Черное море. Том IV. (Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей.) – Севастополь «ЭКОСИ – Гидрофизика», 1996.
5. Толмазин Д.М., Шнайман В.А., Ациховская Ж.М. Проблемы динамики вод северо-западной части Черного моря. – Киев: Наукова думка, 1969. – 130 с.
6. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрологических полей Черного моря. – Л.: Гидрометиздат.– 1984. – 239 с.
7. Блатов А.С., Расулов М.А., Чечель И.И. Исследование циркуляции вод северо-западной части Черного моря и ее связь с антропогенным воздействием на речной сток // Водные ресурсы. – 1983. - № 4. – С. 30–37.
8. Виноградов К.А., Розенгурт М.Ш., Толмазин Д.М. Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря (в рыбопромысловых целях). – Киев: Наукова думка, 1966. – 96 с.
9. Виноградова Л.А., Васильева В.Н. Многолетняя динамика и моделирование состояния экосистемы прибрежных вод северо-западной части Черного моря – СПб: Гидрометеоздат, УкрНЦЭМ, Одесса, 1992. – 107 с.
10. Стан довкілля Чорного моря: Національна доповідь України. 1996 – 2000 роки. УкрНЦЕМ – Одеса: Астропринт, 2002. – 80 с.
11. Андрианова О.Р., Белевич Р.Р., Скипа М.И. Об особенностях изменчивости основных характеристик Одессы в XX столетии // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 5 – С. 19–29.
12. Толмазин Д.М. Сгонные явления в северо-западной части Черного моря // Океанология. – 1963. – вып. 5. – С. 848–852.
13. Тучковенко Ю.С., Доценко С.А., Дятлов С.Е. и др. Влияние гидрологических условий на изменчивость гидрохимических и гидробиологических характеристик вод Одесского региона северо-

- западной части Черного моря // Морський екологічний журнал. – 2004. – № 4. – С. 75–85.
14. Черное море: Сборник / А. Вылканов, Х. Данов, Х. Маринов и др., пер. с болгарского. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 408 с.
 15. Казаков А.Л. Об использовании различной информации по ветру в прикладных исследованиях // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2005. – № 49. – С. 190–203.
 16. Кліматичні стандартні норми (1961–1990 рр.). Укр. НІГМІ ЦГО. – Київ, 2002. – 145 с.
 17. Ивус Г.П., Агайар Э.В., Ешану А.Е. Особенности температурно-ветрового режима в районе Одессы на рубеже XXI века // Причорноморський екологічний бюлетень. – 2007. – № 2(24). – С. 181–190.
 18. Большаков В.С. Трансформация речных вод в Черном море. – Киев: Наукова думка, 1970. – 328 с.
 19. Доценко С.А., Рясинцева Н.И., Савин П.Т., Саркисова С.А. Специфические черты гидрологического и гидрохимического режимов и уровень загрязнения прибрежной зоны моря в районе Одессы // Исследования шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна: Сб. научн. тр.– Севастополь: МГИ НАНУ.– 1995.–С.31–43.
 20. Калугина-Гутник А.В. Фитобентос Черного моря. – Киев: Наукова думка, 1975. – 347 с.
 21. Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Берлинский Н.А., Гончаров А.Ю. Районирование Украинского сектора северо-западной части Черного моря (по гидрофизическим и гидрохимическим характеристикам) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2000. – С. 9–24.
 22. Совга Е.Е., Жоров В.А., Богуславский С.Г., Сидень В.П. Районирование акватории северо-западной части черного моря при математическом моделировании шельфовых экосистем // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: Зб. наук. праць. – 2005. – Вип.12. – С. 421–428.
 23. Екологічний стан Чорного моря за 2001 рік // Причорноморський екологічний бюлетень. – 2002. – №2 (4). – С. 123–175.
 24. Екологічний стан Чорного моря за 2002 рік // Причорноморський екологічний бюлетень. – 2003. – №2 (8). – С. 101 – 144.
 25. Долинский С.К., Савусин В.П., Патлатюк Е.Г. и др. Задачи госинспекции охраны Черного моря в решении экологических проблем Черного моря // Экологические проблемы Черного моря. Сб. научн. ст. / Одес. центр научн.-технич. и эконом. информации – Одесса: ОЦНТИ, 1999. – С. 3–6.

26. Патлатюк Е.Г. Экологическое состояние Черного моря // Причерноморський екологічний бюлетень. – 2001. – № 2. – С. 133–135.
27. Берлинский Н.А., Богатова Ю.И., Большаков В.Н. и др. Качество водной среды и донных отложений Одесского порта (программа «Глобалласт» // Екологічні проблеми Чорного моря: Зб. Матеріалів до 5-го Міжнародного симпозіуму, (Одеса, 30 – 31 жовтня, 2003 р.) / Одеськ. центр наук.-техніч. та економіч. інформації – Одеса: ОЦНТЕІ, 2003. – С. 65–68.
28. Климентьев И.И., Бабич И.В. Санитарно-гигиенические аспекты состояния прибрежной зоны г. Одессы // Экологические проблемы Черного моря. Сб. научн. ст. / Одес. центр научн.-технич. и эконом. информации – Одесса: ОЦНТИ, 1999. – С. 112–116.
29. Корчак Г.И., Харина Л.А. Санитарно-микробиологическая характеристика морских вод и основных источников загрязнения рекреационной зоны г. Одессы // Труды международной научно-практической конференции «Экологические проблемы Одесского региона и их решение» / Одес. центр научн.-технич. и эконом. информации – Одесса, 1995. – С. 148–152.
30. Иванова А.Н. Состояние загрязнения прибрежной зоны Черного моря (экономзоны Украины) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2004. – Вып. 10. – С. 123–129.
31. Куделіна С.Б., Мірошніченко О.А. і др. Прибережна зона Одеської області: рівень антропогенного навантаження та екологічний стан // Экологические проблемы Черного моря. Сб. научн. ст. / Одес. центр научн.-технич. и эконом. информации – Одесса: ОЦНТИ, 1999. – С. 122–125.
32. Оценка влияния берегозащитного и противооползневого строительства в г. Одессе на экосистему береговой зоны и побережья: Отчет о НИР / ОФ ИнБЮМ НАН Украины; шифр темы: 7/90. – Од., 1994. – 123 с.
33. Экологическое обоснование удаленных выпусков в море ливневых вод г. Одессы: Отчет о НИР / ОФ ИнБЮМ АН Украины; шифр темы: 10/89. – Од., 1990. – 172 с.
34. Тучковенко Ю.С., Сапко О.Ю. Оценка вклада антропогенных источников Одесского региона в загрязнение морской среды // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2003.– № 47. – С. 130–139.
35. Методика расчета предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ в водные объекты со сточными водами. – Харьков, 1990. – 113 с.

- 36.Схема ливневой канализации г. Одессы. Том I. Общая пояснительная записка. / «Укрюжгипрокоммунстрой». Заказ № 5910 – Од., 1991. – 35 с.
- 37.Экология города: Учебное пособие / Под ред. Стольберга Ф.В. – К.: Либра, 2000. – С. 112.
- 38.Схема развития хозяйственно-бытовой канализации г. Одессы. / «Укрюжгипрокоммунстрой». Заказ № 4689 – Од., 1980.
- 39.Кичигин В.И., Быкова П.Г. Исследование физико-химических характеристик поверхностного стока населенных пунктов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002 г. – № 11. – С. 28–32.
- 40.Дятлов С.Е., Патлатюк Е.Г., Никаноров В.А. и др. Качество дренажных, ливневых и сточных вод, сбрасываемых в море и Хаджибейский лиман // Екологічні проблеми Чорного моря: Зб. Матеріалів до 4-го Міжнародного симпозиуму, (Одеса, 31 жовтня – 1 листопада, 2002 р.)/Одеськ. центр наук.-техніч. та економіч. інформації – Одеса: ОЦНТЕІ. – 2002. – С. 69–73.
- 41.Вишневський В.І. Річки і водойми України. Стан і використання. – К.: Віпол, 2000. – 376 с.
- 42.Днепровско-Бугская эстуарная экосистема / [Жукинский В.Н., Журавлева Л.А., Иванов А.И. и др.]; отв. ред. Зайцев Ю.П. – Киев: Наукова думка, 1989. – 240 с.
- 43.Миньковская Р.Я., Ильин Ю.П., Хоромич Н.Г., Мишина Л.А. Роль устьевых областей крупных рек Украины в поступлении биогенных веществ в Черное море // Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей: Тезисы докладов, (Крым, Донузлав, 13–16 сентября 2005 г.) / Океанологический центр НАН Украины, Морской гидрофизический институт НАН Украины – Крым, Донузлав. – 2005. – С. 52.
- 44.Дослідження Дністра: 10 років громадської екологічної експедиції “ДНІСТЕР” / [редактор М.І. Жарких]. – Львів – Київ, 1998. – 216 с.
- 45.Справочник по водным ресурсам / [под ред. Б.И. Стрельца]. – К.: Урожай, 1987. – 340 с.
- 46.Звіт про стан навколишнього природного середовища в Одеській області в 2002 році // Причорноморський екологічний бюлетень. 2003. – № 2. – С. 5–88.
- 47.Санитарные правила и нормы охраны прибрежных вод морей от загрязнения в местах водопользования населения. СанПиН №4631-88. – Москва – 1988 г. – 16 с.
- 48.Постанова КМУ від 29.03.2002 р. №431 “Про внесення змін до постанови КМУ від 29.02.1996 р. №269” “Правила охорони внутрішніх морських вод і територіального моря України від забруднення та засмічення” / Збірник законодавчих актів України

- про охорону навколишнього природного середовища. Т. 8. – Чернівці: Зелена Буковина, 2002. – С. 210-213.
49. Водний кодекс України // Збірник законодавчих актів України про охорону навколишнього природного середовища. Т.1 – Чернівці: „Зелена Буковина”, 1997. – С.283–304.
50. Тимченко З.В. Методика оценки экологического состояния малых рек / Статистичний моніторинг екологічного стану регіону, галузі. – Житомир-Київ, 1997. – С. 104–108.
51. Сафранов Т.А., Чугай А.В., Тимченко З.В. Возможности оценки качества морской среды // Екологічні проблеми Чорного моря: Зб. Матеріалів до 5-го Міжнародного симпозіуму, (Одеса, 30 – 31 жовтня, 2003 р.) / Одеськ. центр наук.-техніч. та економіч. інформації – Одеса: ЦНТЕПІ ОНЮА, 2003. – С. 291–295.
52. Тучковенко Ю.С., Чугай А.В., Сапко О.Ю., Дятлов С.Е. Интегральная оценка качества вод Одесского региона северо-западной части Черного моря // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.– 2005. – № 49. – С. 360–367.
53. Обобщенный перечень предельно-допустимых концентраций и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ в водах рыбохозяйственных водоемов. – М., 1990. – 44 с.
54. Vollenveider R.A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index // *Environmetrics*. – 1998. – № 9. – P.329–357.
55. Moncheva S., Doncheva V. Eutrophication index (TRIX) – an operational tool for the Black Sea coastal water ecological quality assessment and monitoring. / *Internat. symposium “The Black Sea ecological problems”* – Odessa, SCSEIO, 2000. – P.178–185.
56. Тучковенко Ю.С., Сапко О.Ю. Оценка эвтрофикации вод Одесского региона северо-западной части Черного моря // *Вісник Одеського державного екологічного університету*. – 2006. – № 2. – С. 224–227.
57. Губанов В.И., Мальченко Ю.А. и др. Диагноз современного состояния вод Севастопольского взморья (Черное море) по результатам мониторинга гидрохимических характеристик // *Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу – Севастополь, 2005. – С.141–148.*
58. Тучковенко Ю.С. Математическая модель формирования термохалинной структуры и циркуляции вод в лиманах, приустьевых и шельфовых областях северо-западной части Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и*

- комплексное использование ресурсов шельфа. – 2003. – № 4. – С. 138–153.
59. Hess K.W. MECCA Programs documentation: Technical Report / NOAA.– NESDIS 46.– Washington, D.C., 1989. – 97 p.
 60. Иванов В.А., Тучковенко Ю.С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. – Севастополь: МГИ НАН Украины.–2006.- 368 с.
 61. Munk W.H., Anderson E.R. Notes on the theory of the thermocline // J. Mar. Res.– 1948.– № 7.– P. 276 - 295.
 62. Tag P.M., Murray F.W., Koenig L.R. A comparison of several forms of eddy viscosity parametrization in a two-dimensional long-wave propagation: Technical Memorandum 32 / U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.– USA, 1979.– 29 p.
 63. Тучковенко Ю.С., Савин П.Т. Моделирование. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы: абиота / Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. – К.: Наукова думка.- 2006.- С. 102-124.
 64. Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря / [под ред. И.Н. Давидана, Р.В. Пясковского, О.П. Савчука]. Вып. 3. Моделирование компонентов экосистемы – Л.: Гидрометеиздат, ЛО ГОИН, 1987. – 255 с.
 65. Ляхин Ю.И. О скорости обмена кислородом между океаном и атмосферой // Океанология. – 1980. – Т. 18, № 6. – С. 1014–1021.
 66. Cerco S.F., Cole T. User's Guide to the CE – QUAL – ICM. Three – Dimensional Eutrophication Model.-U. S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station. 1995. – 150 p.
 67. Тучковенко Ю.С. Трехмерная математическая модель качества вод Днепровско-Бугского приустьевого района северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2005. – Вып. 12. – С. 374–391.
 68. Тучковенко Ю.С., Иванов В.А. Моделирование процессов формирования качества вод северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2007.– Вып. 15.– С. 304 - 325.
 69. Тучковенко Ю.С., Сапко О.Ю. Оценка влияния СБО «Северная» на загрязнение вод Одесского района северо-западной части Черного моря // Збірник доп. та статей Всеукраїнської науково-практичної конференції «Екологія міст та рекреаційних зон» - Одеса: ІНВАЦ, 2-3 червня 2011.– С. 68 - 71.

70. Тучковенко Ю.С., Сапко О.Ю. Влияние ливневого стока на качество вод прибрежной зоны г. Одессы // Вісник Одеського державного екологічного університету – 2007. – № 4. – С. 228–239.
71. Процессы самоочищения морских вод от химических загрязнений / [под ред. А.И. Симоновна] – М.: Гидрометеоздат. – 1983. – 152 с.
72. Mancini J.J. Numerical Estimation of Coliform Mortality Rates under Various Conditions // Journal of Water Pollution Control Federation. – 1978. – Vol. 50 – P. 2477.
73. Родзиллер И.Д. Прогноз качества воды водоемов – приемников сточных вод. – М.: Стройиздат, 1984. – 263 с.
74. Методика розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України від 18.05.1995 р. №37 // Збірник законодавчих актів України про охорону навколишнього природного середовища. Т.3. – Чернівці: Зелена Буковина, 1996. – С. 155–167.