

Д. Я. Фащук

**ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ МОРСКОГО
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ**

Учебное пособие

Южно-Сахалинск
2010

УДК 551.46:574(075.8)

ББК 26.221я73

Ф 30

*Печатается по решению учебно-методического совета
Сахалинского государственного университета, 2010 г.*

Ф 30 Фашук, Д. Я. Эколого-географические основы морского природопользования: учебное пособие / Д. Я. Фашук. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. – 240 с.

ISBN 978-5-88811-316-5

В пособии анализируются основные климатообразующие факторы, формы и количественные критерии антропогенной нагрузки на водные ресурсы, их пространственная и временная изменчивость, последствия изменений для атмосферы и гидросферы. Предлагается методика составления эколого-географической модели морского водоема – информационной базы для математического моделирования морских экосистем. Исследуются типы математических моделей, эколого-географические аспекты результатов моделирования, возможности и особенности наиболее адекватных в этом плане моделей.

Пособие предназначено для студентов, аспирантов и преподавателей факультетов природопользования и устойчивого развития, географических факультетов, а также для специалистов, работающих в области эксплуатации морских сырьевых ресурсов и охраны природы.

Рецензенты:

Петухов В. И., докт. тех. наук, профессор, директор Института инженерной и социальной экологии Дальневосточного государственного технического университета (ДВПИ им. В. В. Куйбышева);

Пищальник В. М., докт. тех. наук, профессор кафедры геомониторинга и геоинформационного картографирования СахГУ.

УДК 551.46:574(075.8)

ББК 26.221я73

Учебное издание

ФАЩУК Дмитрий Яковлевич

**ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОРСКОГО
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ**

Корректор В. А. Яковлева. Верстка Т. В. Филипенко

Подписано в печать 06.12.2010. Бумара «SvetoCopy»
Гарнитура «Bookman Old Style». Формат 60х84^{1/16}.
Тираж 500 экз. Объем 30 усл. п. л. Заказ № 519-10
Издательство Сахалинского государственного университета
693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, каб. 32
Тел. (4242) 45-23-16, факс (4242) 45-23-17.
E-mail: polygraph@sakhgu.sakhalin.ru

ISBN 978-5-88811-316-5

© Сахалинский государственный
университет, 2010
© Фашук Д. Я., 2010

Содержание

Введение	6
-----------------------	---

Глава 1. МОРЯ И ВОДОСБОРНЫЕ БАССЕЙНЫ КАК ЕДИНАЯ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

1.1. Основные природные климатообразующие факторы ..	12
1.1.1. Земные и космические факторы и результаты их взаимодействия	13
1.1.2. Естественный парниковый эффект	18
1.2. Роль Мирового океана в формировании климата	20
1.2.1. Геохимические тупики морского дна	21
1.2.2. Глобальный межокеанский конвейер	23
1.3. Признаки современного потепления климата и его последствия	29
1.3.1. Изменение структуры и интенсивности атмосферных процессов	31
1.3.2. Глобальные и региональные изменения в гидросфере	32
1.3.3. Механизм возникновения катастрофических наводнений	38
1.4. Реакция морских экосистем на климатические колебания речного стока (на примере Каспийского моря)	40
1.4.1. Современная динамика уровня моря	41
1.4.2. Активизация анаэробных процессов	45
1.4.3. Экологические последствия колебаний уровня Каспия	46
1.4.4. Народно-хозяйственные последствия новейшей трансгрессии Каспийского моря	47
1.5. Актуальные проблемы взаимодействия атмосферы и гидросферы в условиях потепления климата	49
1.5.1. Речные гидрологические системы	49
1.5.2. Внутренние и окраинные моря	50
1.5.3. Глобальные гидроэкологические задачи	51

Глава 2. АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ: ФОРМЫ, КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ, ГЕОГРАФИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ, СТРАТЕГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Использование природных вод человеком	53
2.2. Гидротехническое строительство, зарегулирование и внутригодовое перераспределение речного стока	57
2.3. Последствия зарегулирования стока рек	62

2.4. Последствия безвозвратного водопотребления	64
2.4.1. Гибель Аральского моря	65
2.5. Количественные критерии антропогенной нагрузки на водные ресурсы	67
2.5.1. Водосборы стран мира	68
2.5.2. Водосборы территории России	70
2.6. Показатели качества природных вод	103
2.7. Количественные критерии качества природных вод	107
2.8. Реакция прибрежных морских экосистем на трансформацию речных водных ресурсов (на примере Черного моря)	109
2.8.1. Гидрологическая структура вод	110
2.8.2. Гидрохимическая структура вод.	111
2.8.3. Механизм влияния количественных и качественных изменений речного стока на гидрологическую и гидрохимическую структуру вод шельфа.	116
2.8.4. Механизм изменения химического состава вод шельфа и показателей их биологической продуктивности	117
2.9. Международное сотрудничество по водным проблемам суши	119
2.10. Международное сотрудничество в области исследования Мирового океана	122
2.10.1. Исследования Мирового океана до середины XX века.	123
2.10.2. Структура международной сети организаций для исследования природы Земли	127
2.10.3. Международные программы мониторинга морской среды	130
2.10.4. Ведущие национальные программы России и США по исследованию Мирового океана в XXI веке. . .	132

Глава 3. ГЕОГРАФО-ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МОРСКОГО ВОДОЕМА

3.1. Морская экологическая информация	137
3.2. Традиционные схемы систематизации морской экологической информации	140
3.3. Географо-экологические принципы систематизации морской информации	142
3.4. Наглядное представление морских экологических данных и принципы экологического картографирования морских акваторий.	144
3.4.1. Ретроспективные карты палеогеографических реконструкций	145
3.4.2. Диагностические морские экологические карты . . .	151

3.4.3. Комплексное представление морской экологической информации	166
3.4.4. Прогностические морские экологические карты .	171
3.4.5. Генеральные экологические карты-схемы морских водоемов	173
3.5. Толерантность морских организмов к воздействию загрязняющих веществ	173
3.5.1. Нефтепродукты, фенолы, детергенты.	175
3.5.2. Хлорорганические пестициды.	177
3.5.3. Тяжелые металлы	178
3.6. Интегральная оценка степени остроты морской экологической ситуации	184
3.7. Экологическая значимость территории водосбора для морских акваторий (на примере Охотского моря) . .	187
3.7.1. Гидролого-климатические характеристики водосборного бассейна	190
3.7.2. Административно-территориальное деление водосборного бассейна	196
3.7.3. Использование земель, распределение и характер промышленного производства	198
3.7.4. Интегральные критерии экологической значимости территории водосбора для морского водоема	203
3.8. Выводы	209

Глава 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ: ГЕОГРАФО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

4.1. Типы математических моделей морских экосистем	213
4.2. Задачи математического моделирования в морской экологии.	216
4.3. Моделирование биохимических процессов в морских экосистемах	218
4.3.1. Формализация биохимических процессов в математических моделях	219
4.3.2. Точечные модели.	222
4.3.3. Боксовые модели.	224
4.3.4. Непрерывные модели.	225
4.3.5. Гидроэкологическая модель трансформации соединений органогенных элементов	226
4.4. Гидродинамические модели морской среды	228
4.4.1. Российская гидродинамическая модель нефтяного разлива «SPILLMOD»	230
4.5. Выводы	236

Рекомендуемая литература	238
---	------------

*Наука строится из фактов, как дом из кирпичей,
но простое собрание фактов столь же мало
является наукой, как куча камней – домом.*

Анри Пуанкаре.

Введение

История изучения большинства внутренних и окраинных морей Мирового океана насчитывает десятки, а иногда и более сотни лет. За это время естествознанием и другими науками накоплен большой объем информации о состоянии морских водоемов, характере природных и антропогенных воздействий на их экосистемы. Сроки, районы, регулярность наблюдений, а также способы получения и обобщения этих данных, принадлежащих различным ведомствам, значительно отличаются.

Стремление представить (используя накопленную информацию) морской водоем средствами *математики* привело к разработке гидродинамических, динамико-статистических, имитационных и других моделей, позволяющих исследовать отдельные стороны жизни моря. Тем не менее создание достаточно адекватной математической модели морской экосистемы пока остается делом будущего. Это связано не только со сложной структурой объекта моделирования и недостаточным качеством используемых данных. Значительную роль в этом процессе играет субъективный фактор – необходимость понимания авторами математических моделей природы исследуемых ими явлений.

Начало XXI века в естествознании совпало со значительными достижениями в области исследования морских и сухопутных водоемов мира. Прогресс в оценках их состояния, пространственной и временной изменчивости условий среды, механизмов развития гидроэкологических ситуаций определился суммой результатов, полученных целым комплексом географических наук. В первую очередь в этом плане преуспели климатология, гидрология суши, океанология, морская геология и геоморфология, гляциология, палеогеография. Кроме того, значительным позитивным фактором при современных исследованиях состояния водных ресурсов планеты, и в частности России и сопредельных государств, оказались также развитие и реализация на практике математиками и географами аппарата математического моделирования отдельных компонент природных гидроэкологических систем и последствий их изменения.

Успехи исследований в сформировавшемся, таким образом, в

географии гидроэкологическом направлении как в региональном, так и в глобальном масштабах проявляются прежде всего в двух аспектах.

Первый – **диагностический**, связанный с изучением влияния на водные ресурсы климатических и антропогенных изменений условий среды, сбором фактов происходящих трансформаций отдельных составляющих водного баланса и их экологических последствий.

Второй – **прогностический**, отражающий результаты исследования тенденций и прогноза возможных экологических последствий этих изменений, попыток разработать научную основу системы управления водными ресурсами и рационального природопользования в рамках концепции устойчивого развития.

В этих обстоятельствах успешность гидроэкологического прогноза связана с умением специалиста-природопользователя работать с огромными массивами многоплановой, междисциплинарной информации, отражающей результаты, полученные в ходе как полевых, так и камеральных аналитических исследований.

Современный опыт анализа состояния экологических условий на нашей планете [Медоуз и др., 2007], и в частности состояния морских акваторий, показывает, что, несмотря на разработанные в конце XX века концепции фундаментальных основ гидроэкологии Мирового океана и многолетнюю историю изучения большинства внутренних и окраинных морей, ответы на интересующие ученых и практиков вопросы сегодня затягиваются на долгие годы, нередко оставаясь при этом все равно на уровне гипотез.

Одним из подтверждений сказанного может служить тот факт, что, например, для объяснения причин развития с первой половины 1970-х гг. на северо-западном шельфе Черного моря заморных явлений (массовой гибели донных гидробионтов) потребовалось около десяти лет. Такое же время, несмотря на более чем 100-летнюю историю изучения этого водоема, заняло доказательство нереальности выхода на поверхность и возгорания сероводорода в открытой части Черного моря, вследствие этого отсутствие необходимости «спасения» населения причерноморских стран и самого моря от предполагаемой катастрофы посредством строительства в Новороссийске гигантского энергетического комплекса по добыче из глубин и переработке этого газа.

Одна из основных причин наличия «белых пятен» в области диагноза и прогноза состояния морских акваторий – *отсутствие методических разработок для систематизации многоплановой морской экологической информации, ее наглядного представления и оперативного доведения до потенциальных потребителей*. Авторы современных концепций исследования морских экосистем предлагают принципы систематизации лишь отдельных видов гидроэкологической информации, исследуют важные, но тем не менее весьма узкие профессиональные стороны проблемы.

В этой связи представляется перспективным предложенный в 70-х гг. прошлого века академиком К. К. Марковым, но, к сожалению,

нию, недостаточно используемый до сих пор способ отображения морского водоема – его моделирование, с помощью средств *географической науки*. *Географо-экологическое моделирование морей и водосборных бассейнов* – одно из новых научных направлений современной географии. Его возникновение и развитие связаны с назревшей острой необходимостью объединить достижения различных областей естествознания о природе внутренних и окраинных морей Мирового океана и их водосборов для комплексной оценки и прогноза их состояния в условиях климатических изменений и хозяйственной деятельности – основы рационального природопользования для устойчивого развития.

При этом в отличие от традиционных методов анализа информации выделяются и исследуются не только режимные характеристики водоемов, но и *приоритетные природные и антропогенные процессы*, влияющие на состояние моря, а также существующие здесь причинно-следственные экологические связи и их пространственно-временная изменчивость. Такой подход позволяет рассмотреть объект со всех (физической, химической, биологической и др.) сторон, понять его природу, используя оптимум информации. В географических моделях, как и в физических, «наблюдаемая картина теряет в богатстве оттенков, но зато выигрывает в ясности», именно они могут служить базой для математического моделирования морских водоемов.

Основу концепции морских географо-экологических исследований составляют следующие положения:

- *морские гидроэкологические ситуации формируются под влиянием комплекса взаимосвязанных атмосферных, гидрологических и океанологических процессов;*
- *окраинные, внутренние моря и их водосборные бассейны представляются едиными геосистемами, неразрывно связанными друг с другом;*
- *состояние морской среды, особенно в прибрежных водах, зависит от условий формирования, объема и качества водных ресурсов водосборов.*

Цели учебного пособия

1. Продемонстрировать студентам цепочку причинно-следственных связей, возникающих в системах «атмосфера–гидросфера» и «водосборный бассейн–море» в результате климатических или антропогенных изменений условий окружающей среды.

2. Познакомить студентов с методологией создания географо-экологической информационной модели-«портрета» морского водоема – основными принципами и методами систематизации, «сворачивания» и наглядного представления многоплановой межведомственной геоэкологической и народно-хозяйственной информации.

3. Дать студентам представление об основных направлениях математического моделирования состояния морской среды и возмож-

ностях современных моделей (как аппарата расчета) при решении морских экологических задач на основании географо-экологической информационной модели (как источника входных данных).

Задачи учебного пособия

I. Ознакомить студентов:

- с основными механизмами и признаками климатических изменений на планете;
- с последствиями климатических изменений для атмосферы и гидросферы;
- с основными современными проблемами взаимодействия атмосферы и гидросферы в связи с наблюдающимся потеплением климата.

II. Ознакомить студентов:

- с основными формами антропогенного воздействия на морские экосистемы, их пространственно-временными масштабами, экологическими последствиями;
- с основными способами, масштабами и географией мирового водопользования;
- с количественными критериями антропогенной нагрузки на водные ресурсы и их изменчивостью по планете;
- с показателями и количественными критериями качества природных вод;
- с формами реакции прибрежных морских экосистем на изменение водных ресурсов водосбора;
- с основными этапами международного сотрудничества в области исследования водных ресурсов суши и Мирового океана.

III. Ознакомить студентов:

- с особенностями и структурой морских географо-экологических данных, отметив при этом обилие и разнообразие информации, необходимой для адекватного анализа причин изменения условий морской среды, прогнозирования их возможных тенденций и последствий;
- с традиционными принципами и методами систематизации морской экологической информации;
- с принципами и методами географо-экологического информационного моделирования морских водоемов.

IV. Предложить методiku систематизации сведений о природных и антропогенных процессах, развивающихся на морских акваториях и территориях водосборов, а также аппарат для формализации и наглядного представления морской экологической информации в целях оперативной оценки состояния прибрежных морских экосистем, установления возможных причин экологических трансформаций или обоснования выбора направления их поиска:

- интегральный индекс концентрации жизни;
- индекс аномальности состояния биотических компонент морской экосистемы;

- индекс суммарной удельной антропогенной нагрузки на речной сток и прибрежные воды шельфа;
- индекс повторяемости пленок нефтепродуктов на морской акватории;
- показатель антропогенной нагрузки на водные ресурсы водосборных бассейнов;
- индекс потенциальной экологической опасности для моря промышленного производства городов водосборного бассейна;
- диагностические и комплексные морские экологические карты;
- интегральные карты-схемы природных и антропогенных факторов воздействия на морские экосистемы.

V. Познакомить студентов:

- с историей становления концепции математического моделирования морских экосистем как самостоятельного научного направления;
- с основными водно-экологическими проблемами, решаемыми с помощью математического моделирования;
- основными водно-экологическими понятиями и критериями, которыми следует руководствоваться при разработке водно-экологических моделей;
- практическими возможностями современного математического моделирования условий морской среды.

В первой главе учебного пособия *«Моря и водосборные бассейны как единая гидроэкологическая система в условиях природных изменений климата»* анализируются основные природные климатообразующие факторы, исследуются признаки глобального потепления на планете и его последствия для атмосферы и гидросферы. На примере Каспийского моря исследуется цепочка причинно-следственных связей в системе «атмосфера-гидросфера» и их дальнейшее развитие в геосистеме «водосборный бассейн-море» под влиянием динамики климата. Выделяются актуальные проблемы взаимодействия атмосферы и гидросферы в условиях климатических трансформаций.

Во второй главе *«Антропогенная нагрузка на водные ресурсы: формы, количественные критерии, география, экологические последствия, стратегия исследования»* дается характеристика основных форм, количественных критериев и масштабов антропогенных нагрузок на водные ресурсы. Исследуются их география и временная изменчивость, а также экологические последствия. На примере Аральского моря демонстрируется цепочка причинно-следственных связей, развивающихся в геосистеме «море-водосбор» в результате антропогенного вмешательства в ее водный баланс и закончившихся экологической и гуманитарной катастрофой в Аральском регионе. Кроме того, в главе анализируются цели и основные этапы международного сотрудничества в области исследования водных ресурсов суши и Мирового океана.

В третьей главе *«Географо-экологическая информационная модель морского водоема»* излагаются методологические принципы

систематизации и наглядного представления межведомственной многоплановой экологической и народно-хозяйственной информации для оперативного доведения ее до потенциальных потребителей. В результате их реализации на примере Черного моря и водосборного бассейна Охотского моря создаются элементы географо-экологической модели этих водоемов – информационная база для диагноза состояния морской экосистемы, оценки последствий хозяйственной деятельности и моделирования перспектив ее изменений с помощью аппарата математики.

В четвертой главе *«Географо-экологические аспекты математического моделирования морских экосистем»* анализируются существующие типы математических моделей морских экосистем, представляются задачи математического моделирования в морской экологии, исследуются возможности и особенности наиболее адекватных в этом плане моделей: гидроэкологической модели трансформации органогенных соединений в морской среде и российской гидродинамической модели нефтяных разливов «SPILLMOD».

Глава 1. МОРЯ И ВОДОСБОРНЫЕ БАССЕЙНЫ КАК ЕДИНАЯ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Происхождение слова «климат» и других связанных с ним терминов уходит корнями глубоко во времена античности и имеет весьма любопытную древнюю историю. В IV веке до н. э., когда в Греции идея шарообразности Земли и преобладания на ней океанов не подвергалась сомнению, философ Эвдокс Книдский (400–347 гг. до н. э.), возглавлявший в то время известную академию Платона, разработал (367 г. до н. э.) теорию тепловых поясов нашей планеты. Исходя из представлений о возрастающем наклоне солнечных лучей относительно ее сферической поверхности, напарник Платона (428/27–348/47 гг. до н. э.) совершенно справедливо назвал эти пояса **климатическими зонами** (от греч. «*klima*» – наклон), объяснив, таким образом, неравномерность нагрева земной поверхности. Эту идею подхватил его семнадцатилетний ученик Аристотель (384–322 гг. до н. э.). Развивая ее, он разделил земной шар, в зависимости от продолжительности дня, на пять климатических поясов. Экваториальный – «необитаемый вследствие жары», два приполярных – «необитаемых вследствие холода» и два промежуточных – «умеренных, обитаемых».

Границы этих поясов почти век спустя (250 г. до н. э.) установил греческий математик, философ Эратосфен (276–194 гг. до н. э.). По его вычислениям окружность Земли составила около 25 000 миль (по современным данным – 24 860 миль), жаркая зона занимает на ней 48° по обе стороны от экватора. 24-й градус к северу и югу от экватора был обозначен как **«линия тропика»** (Рака и Козерога соответственно), холодные зоны занимали по 24° от полюсов, ограничиваясь **«Северным и Южным полярным кругом»**, а умеренные области располагались между тропиками и полярными кругами. За эти подвиги Эратосфена заслуженно считают «отцом географии».

1.1. Основные природные климатообразующие факторы

Современные исследователи природы Земли термином **«климат»** называют среднее многолетнее состояние метеорологических условий на нашей планете, которое почти полностью определяется интенсивностью потока солнечной радиации, то есть количеством тепла, посылаемого Солнцем к внешней границе земной атмосферы. Часть этого потока (31 %) отражается, часть (23 %)

поглощается воздухом, большая часть (46 %) достигает Земли и нагревает ее поверхность. Излучая полученное солнечное тепло, земная поверхность, в свою очередь, обогревает прилегающие слои атмосферы. Таким образом, **Солнце нагревает атмосферу Земли «снизу»**, посредством подстилающей поверхности суши. Этот процесс носит зональный характер, так как экваториальная зона прогревается более интенсивно, чем полярная. Так формируются климатические широтные пояса на суше.

1.1.1. Земные и космические факторы и результаты их взаимодействия

Природообразующие факторы нашей планеты подразделяются на **земные** (внутренние) и **космические** (внешние). Самым продолжительно действующим климатообразующим фактором (миллиарды лет) на Земле является **геохимическая эволюция атмосферы и океана**. Самыми мощными – **дрейф континентов и блуждание полюсов**. Время их действия – десятки и сотни миллионов лет. Последние 90 лет климат изменяется под действием факторов, время действия которых колеблется от десятков тысяч до сотен лет. Самым кратковременным фактором, способным за несколько лет изменить климат Земли, оказывается **извержение вулканов**.

В 1783 г. после катастрофического извержения вулкана Лакагигар в Исландии вся Европа покрылась «сухим туманом», оказавшимся не вулканической пылью, а аэрозолем серной кислоты – сернистым ангидридом (SO_2), попавшим в атмосферу после извержения. Как показали дальнейшие анализы, охлаждающий эффект подобного «тумана» может составлять от $-0,4$ до -1°C . Известно, что 73,5 тыс. лет назад после мощного извержения вулкана Тоба на о. Суматра среднеглобальная температура земной атмосферы понизилась на $3-4^\circ\text{C}$, что могло стать причиной начала очередного ледникового периода, длившегося 60 тыс. лет.

Таким образом, при определенной мощности извержения миллионы тонн сернистого ангидрида поднимаются на высоту до 11 км. В течение пяти-шести лет это облако может окутывать большую часть земного шара, препятствуя проникновению сюда тепловой солнечной радиации. После мощного извержения вулкана Кракатау (1883 г.) в период 1884–1886 гг. было, например, зафиксировано сокращение потока среднемесячной солнечной радиации на 25 %. Аналогичное снижение его интенсивности было отмечено в 1902 – 1903 гг. после извержения вулканов Мон-Пеле на о. Мартиника, Санта-Мария в Гватемале и Колима в Мексике, а в 1912–1913 гг. – после извержения вулкана Катмаи.

По мнению академика А. С. Монины, «решать судьбу климата за последние и ближайшие сотни лет будут в первую очередь **внутренние** (земные) процессы перераспределения тепла в океане под влиянием колебаний океанических течений, а среди **внеш-**

них (космических) факторов в этом плане выделяются тепловое и гравитационное («раскачивающее») воздействие на Землю со стороны Солнца и других планет». Первый механизм подразумевает трансформацию материков и океанических течений в процессе продолжающегося дрейфа литосферных плит. Второй – циклические колебания количества солнечной радиации, поступающей в единицу времени на внешнюю границу атмосферы (инсоляции), и «раскачивание» Земли под влиянием гравитационного воздействия Солнца и других планет.

Подтверждением реальности роли **внутренних** (земных) процессов перераспределения тепла в океане для формирования климата Земли служит история Антарктиды, реконструированная по современным данным о дрейфе литосферных плит. 80–50 млн. лет назад (начало кайнозоя) Антарктида вместе с Австралией как единый материк соединялась в районе современного пролива Дрейка с Южной Америкой. Вся эта система омывалась теплыми южными течениями со стороны Тихого и Индийского океанов, определявшими здесь умеренный климат с широколиственными лесами (рис. 1.1).

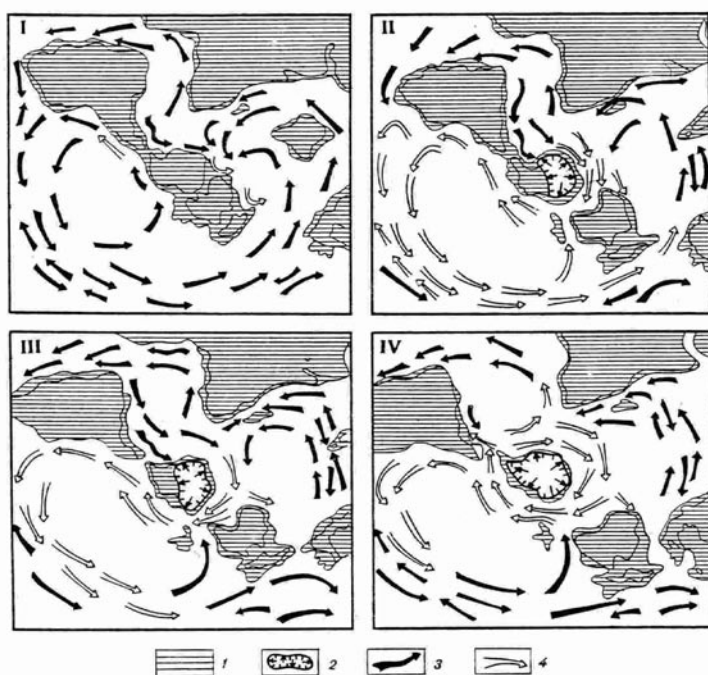


Рис.1.1. Палеотечения в океанах Южного полушария [Котляков, 1994]. I – плиоцен (60 млн. лет назад); II – начало олигоцена (35 млн. лет назад); III – начало миоцена (20 млн. лет назад); IV – современные. 1 – суша; 2 – ледниковый покров; 3 – теплые течения; 4 – холодные течения.

После отделения от нее Австралии (55–53 млн. лет) схема циркуляции из-за образовавшегося пролива нарушилась и температура океана у Антарктиды понизилась с 19 до 12° С, а еще через 15 млн. лет, когда пролив между связкой материков Антарктида – Южная Америка и Австралией расширился и углубился, теплые воды вообще перестали достигать Антарктиды, остывая в зоне пролива. На материке стали формироваться горные ледники, усилившие похолодание и составившие в конце концов Восточно-Антарктический ледниковый щит высотой 1500–1800 м и площадью около 10 млн. км².

Такой сценарий привел к изменению климата всей Земли. Температура воды у экватора снизилась от 28 до 20° С. 14–11 млн. лет назад, когда образовался пролив Дрейка и Антарктиду стал опоясывать циркумполярный поток вод – современное течение Западных Ветров, объединяющее воды трех океанов, температура воды у ее берегов снизилась до 2° С. Началось оледенение западной части материка. Таким образом, пять млн. лет назад площадь ледников Антарктиды достигла максимума.

Интенсивность **внешних** (космических) факторов формирования климата, определяемая величиной инсоляции, зависит от активности термоядерных процессов в недрах Солнца, имеющих известные циклы в десятки и сотни лет. В 1610 г. было установлено, что природным показателем интенсивности тепловых и магнитогидродинамических процессов в недрах Солнца являются пятна на его поверхности. Автор этого открытия до сих пор неизвестен.

В середине XIX века швейцарский астроном Рудольф Вольф организовал регулярные ежедневные наблюдения за «родинками» великого светила. Их количество, рассчитываемое по предложенной ученым методике, получило название **числа Вольфа** и в настоящее время является количественным индикатором солнечной активности. Ее всплески оставляют следы на Земле. В эти периоды изменяются, например, частота полярных сияний, а также изотопный состав углерода и бериллия. Последнее отражается на годовых кольцах деревьев и структуре ископаемых льдов. Эта косвенная информация позволила восстановить приблизительные значения чисел Вольфа за несколько предыдущих веков – до 1500 года. Начало XXI века совпало с весьма высоким уровнем солнечной активности, какой не наблюдалось на протяжении всей 500-летней истории наблюдений. Многие ученые полагают, что в течение этого периода достаточно регулярно отмечались минимумы значений чисел Вольфа и наступали они в нечетные столетия (650–730 гг., 1010–1050, 1280–1340, 1420–1530, 1645–1715 и 1790–1830 гг.).

Промежутки времени между двумя минимумами солнечных пятен называется **циклом** солнечной активности. Начиная с 1755 г. стали выделять такие циклы продолжительностью от 7,3 до 17,1 года (в среднем 11 лет), называя их одиннадцатилетние циклы Швабе–Вольфа. В 2007 г. начался четный – 24-й по счету, одиннадца-

тилетний цикл активности Солнца. Его общая продолжительность составит $10,8 \pm 0,7$ лет. Основные максимумы активности в этот период ожидаются в конце 2009-го – начале 2010-го, в первой половине 2011-го и в конце 2014-го – начале 2015 г. В периоды максимумов для четных одиннадцатилетних циклов характерно:

- понижение давления в арктической зоне и его повышение в умеренных широтах;
- усиление меридионального типа циркуляции атмосферы;
- более активное вторжение арктического воздуха до $30-50^\circ$ с. ш. и общее понижение его температуры.

Кроме одиннадцатилетнего цикла Швабе–Вольфа, в колебаниях солнечной активности выделяют 22-летний цикл Хойла, 80-летний («вековой») цикл, установленный А. А. Ганским и рассчитанный в 1939 г. Глейсбергом, 190-летний цикл («индиктицион» – возвращающийся), установленный Л. А. Предтеченским и рассчитанный в 1948 г. Д. А. Боновым. Влияние всех этих циклов солнечной активности на климатические характеристики носит региональный характер. Для его исследования требуется анализ банков данных многолетних гидрометеорологических наблюдений по каждому конкретному региону.

Колебания климатических характеристик определяется также флуктуациями скорости вращения Земли, которые существенно влияют на характер атмосферных переносов над нашей планетой. Установлено, что в периоды замедленной скорости ее вращения повторяемость меридиональной формы циркуляции атмосферы (С) в Северном полушарии от 50° з. д. до 80° в. д. увеличивается, а зональной (W и E) уменьшается. В настоящее время заканчивается период повышенной скорости вращения Земли, начавшийся в 1973 г. С 2010 г. ожидается наступление цикла ее снижения и соответствующих климатических трансформаций, продлящихся около 35 лет (до 2040–2050 гг.). Полагают, что они будут сопровождаться сокращением масс льда в полярных областях, снижением темпов роста глобальной приземной температуры воздуха, сокращением общего количества облачности и атмосферных осадков. При этом ожидается увеличение средней скорости ветра в приземном слое испарения с поверхности суши и моря.

Гравитационное раскачивание планеты происходит под влиянием: колебаний оси Земли с периодом 26 тыс. лет и угловой амплитудой $27^\circ 27'$ (прецессии); колебаний наклона экватора к эклиптике, изменяющегося от 22 до 25° с периодом 19–23 и 41 тыс. лет; а также колебаний эксцентриситета оси, период которых составляет 100 тыс. лет. Эти факторы также вносят свой вклад в динамику климатических характеристик нашей планеты.

Примером влияния космических факторов на климат Земли могут служить процесс формирования ледников Северной Америки и Евразии, закончившийся три млн. лет назад, и дальнейшая их современная динамика. В отличие от ледников Антаркти-

ды ледникам, например, Гренландии, присущ автоколебательный режим, связанный с нелинейным взаимодействием участвующих в процессе механизмов, наличием обратных связей в системе атмосфера – океан – поверхность ледника или суши.

Начало оледенения самого крупного острова планеты (холодная фаза колебания) связано с развитием процессов «альбедной» обратной связи, так как в ней участвует отражательная способность (альbedo) снежного покрова. Она реализуется в системе «температура океана – снежный покров/морской лед – альbedo – радиационный бюджет – температура океана». Понижение температуры на планете по космическим причинам вызывает увеличение площадей снежного покрова и морского льда, что автоматически повышает количество тепла, отраженного в атмосферу, и дальнейшее нелинейное понижение температур в океане.

Теплая фаза автоколебательного режима оледенения Гренландии связана с развитием обратной связи в системе «температура океана – содержание CO_2 в океане – содержание CO_2 в атмосфере – парниковый эффект – температура». Рост температуры воды океана из-за увеличения потока солнечной радиации (инсоляции) вызывает выделение растворенного в нем углекислого газа в атмосферу, что усиливает парниковый эффект и дальнейший уже нелинейный рост температуры в океане.

Космические (внешние) и **земные** (внутренние) факторы формирования климата Земли оказываются связанными между собой системой причинно-следственных связей, приводящих к колебаниям климата Земли. Так, например, колебания солнечной активности влияют на вулканическую активность, индикатором которой является **кислотный индекс**. Он представляет среднегодовое содержание водородного иона H^+ в ископаемых льдах полярных областей. Периоды минимальной солнечной активности совпадают с периодами повышенной вулканической активности и наоборот. Такую взаимосвязь этих двух явлений установил еще в 1863 г. немецкий геолог Клюге, а в 80-х гг. XX века ее подтвердили данные многочисленных параллельных наблюдений за вулканической деятельностью и состоянием Солнца.

Смена циклов солнечной активности, фиксируемая по величине чисел Вольфа, определяет колебания температуры и количество осадков на планете, что, в свою очередь, вызывает заметные (фиксируемые приборами) изменения скорости вращения Земли. При переходе к периоду высокой активности Солнца и на всем его протяжении в недрах нашей планеты по этой причине возникают динамические перегрузки, приводящие к микроземлетрясениям. В результате этих землетрясений скальные породы вокруг резервуаров с магмой растрескиваются и избыточное давление из них выходит на поверхность, но не в виде мощного извержения, а постепенно, через трещины земной коры. Таким образом, при высокой солнечной активности внутри планеты от-

крывается своеобразный «предохранительный клапан» для «выхода» внутренней энергии Земли.

В периоды пониженной солнечной активности перегрузок в недрах нашей планеты не возникает, «предохранительный клапан» закрыт и рано или поздно избыточное давление сбрасывается путем катастрофических землетрясений и вулканических извержений. Эти события и оказывают огромное «мгновенное» в геологическом масштабе времени влияние на климат Земли.

Все эти и еще множество других малоизученных механизмов должны учитываться при моделировании климата будущего, но из-за сложности климатообразующих факторов и запутанности их причинно-следственных связей **единого механизма смены климата Земли до настоящего времени не установлено.** По этой же причине все разработанные в мире математические модели климата, построенные на системе уравнений термогидродинамики с учетом законов сохранения массы, импульса, энергии, пока далеки от совершенства и могут использоваться только в исследовательских, но не в прогностических целях.

1.1.2. Естественный парниковый эффект

Атмосфера Земли содержит около 78 % азота, 21 % кислорода, немного аргона (0,9 %), незначительные доли процентов двуокиси углерода (0,03 %), закиси азота (N_2O), метана (CH_4), тропосферного озона (O_3), а также фторхлоруглеводородов (фреонов), которые способны избирательно поглощать разные виды радиационного излучения. Для коротковолновых ультрафиолетовых лучей они «прозрачны», а тепловое (инфракрасное) излучение земной поверхности поглощают и переизлучают обратно, способствуя таким образом дополнительному прогреву Земли. Поэтому перечисленные газы вместе с молекулами водяного пара называются **парниковыми**, так как благодаря их присутствию атмосфера функционирует подобно стеклянной крышке парника – задерживает тепло в приземном слое.

Парниковые газы, таким образом, несмотря на незначительное содержание в атмосфере, могут существенно влиять на ее климат, делая его более теплым (при увеличении содержания) или, наоборот, холодным (при снижении содержания). В сумме они задерживают в атмосфере 78 % излучаемого Землей тепла. При этом вклад водяного пара составляет 60 %, а углекислого газа – 18 %. Если CO_2 исчезнет из земной атмосферы, температура нашей планеты понизится на $21^\circ C$ (!). Таким образом, естественное присутствие углекислого газа в атмосфере Земли даже в таких незначительных количествах (0,03 %) защищает нашу планету от переохлаждения. Но еще в 1896 г. автор теории электролитической диссоциации нобелевский лауреат (1903 г.) Сванте Август Аррениус (1859–1927 гг.) в своей книге «Образование миров» отмечал, что в случае повышения содержания CO_2

в атмосфере в два раза температура земной поверхности может возрасти на 4°C .

Известный биоклиматолог М. И. Будыко рассчитал, что если ежегодно в течение трех летних месяцев температура воздуха над Северным Ледовитым океаном будет превышать норму на 4°C , то четырехметровые морские льды могут растаять за четыре года. С их исчезновением температура воздуха здесь уже без всякого парникового эффекта летом составит $+5^{\circ}$, а зимой всего -5°C . Среди многих фантастических прогнозов, связанных с развитием «парникового эффекта» и, соответственно, с потеплением климата, можно отметить предполагавшееся к 1970-м годам прошлого века переселение в Европу африканских животных. Не менее фантастическим было предположение о возможности таяния Западно-Антарктического ледника, что должно привести к повышению уровня океана на 5,5 м – Всемирному потопу.

В середине 50-х гг. XIX века была предложена гипотеза, согласно которой содержание CO_2 в атмосфере Земли и глубинах океана циклично изменяется с периодом в 100 тыс. лет. Это и могло быть причиной чередования ледниковых и межледниковых эпох в течение последнего миллиона лет истории нашей планеты (заметим, без участия человека). Механизм природных изменений климата представляет из себя автоколебательный процесс, включающий следующие этапы: рост количества CO_2 в атмосфере как результат деятельности вулканов и гетеротрофных организмов → потепление климата → расширение площадей, занятых растительностью → увеличение потребления углекислого газа в процессе фотосинтеза → снижение концентрации CO_2 в атмосфере → похолодание на планете. В какой-то момент цикла похолодания, когда скорость потребления CO_2 превысит скорость его образования вулканами и гетеротрофными организмами, начинается новая фаза углеродного цикла, которая ведет к потеплению климата.

Эта гипотеза, как и предположение Сванте Аррениуса, была подтверждена результатами глубокого бурения ледникового щита Антарктиды толщиной 3,5 км, начатого Советской Антарктической экспедицией на станции Восток еще в начале 1970-х гг. Во время образования льда пузырьки воздуха могут захватываться и консервироваться в ледниках на многие тысячелетия, сохраняя таким образом тайну газового состава древних атмосфер. Метод оценки характера палеоклимата основан на знании того, что в теплые эпохи содержание CO_2 в атмосфере увеличивается (до 270–300 ppm), а в холодные – снижается (до 180–200 ppm).

Образцы льда (керны), полученные на разных горизонтах из скважины в Антарктиде, содержат воздух, консервировавшийся в течение почти 420 тыс. лет. Оказалось, что за это время на нашей планете произошло четыре смены климата – похолоданий и потеплений на $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$. Продолжительность каждого из этих периодов составляет, таким образом, около 100 тыс. лет.

Частицы воздуха древней атмосферы сохранились в образцах

льда, добытых путем бурения и на ледниках Гренландии (толщина – 3100–3200 м). Определив в них концентрации CO_2 и возраст пробы, установлено, что в воздухе, сохранившемся в пробе льда из последней ледниковой эпохи (21–17 тыс. лет), концентрация углекислого газа была на 1/3 ниже, чем в современном. Это должно было вызвать снижение средней температуры планеты на 1°C .

Анализируя основные природообразующие факторы планеты и возможные механизмы происходящих климатических изменений, академик А. С. Монин и многие другие исследователи полагают, что к началу XXI века «не установлен вклад цивилизации в происходящее последние 120 лет природное потепление климата».

1.2. Роль Мирового океана в формировании климата

Океан – наиболее инерционное климатическое звено в системе «океан–суша–атмосфера». По аналогии с материковым климат океана представляет собой совокупность средних многолетних гидрофизических характеристик (температуры воды, солености, направления и скорости течений и т. д.), по выражению академика А. С. Монина, «статистический ансамбль». Океанический климат также определяется изменениями уровня солнечной радиации, но в отличие от атмосферы океан нагревается **не «снизу», а «сверху»**. Вся его энергия зависит от интенсивности потоков тепла и света в поверхностные водные слои и характера их преобразования с ростом глубины. Благодаря солнечной радиации поверхность океана получает за сутки в среднем 295 кал/см^2 тепла. Из них 42 % уходит в атмосферу в процессе контактного теплообмена, 51 % теряется при испарении и только 7 % (!) остается в океане (рис.1.2). Однако и этого остающегося тепла в низких и средних широтах оказалось бы достаточно для повышения температуры поверхностного слоя океана за сутки на 7°C , если бы оно не перераспределялось течениями по поверхности и не проникало в глубину в результате вертикального перемешивания.

Верхний метровый слой вод поглощает 62 из тех 7 % суммарной солнечной радиации, остающейся в океане. На расстоянии пяти-шести метров от поверхности поток тепловой энергии уменьшается в 30–70 раз, а глубин 10–20 м она практически не достигает. Теплосодержание верхнего трехметрового слоя Мирового океана эквивалентно количеству тепла, содержащемуся во всей земной атмосфере. Мощность такого аккумулятора огромна. Известно, например, что в тропических морях контрасты температур между поверхностным 100-метровым и глубинными слоями достигают 20° . Только за счет этой разности тропические моря представляют собой энергетическую установку, мощность которой в десять раз превышает годовое производство электроэнергии во всем мире!

Прогрев поверхности океана на экваторе происходит значительно более интенсивно, чем в полярных областях. Таким образом формируются климатические пояса Мирового океана, его тепловой фон – температура поверхностных вод, границы кромки льдов, а вместе с ними и границы распространения морских организмов, особенности их поведения и приспособления к условиям среды.



Рис. 1.2. Радиационный баланс (%) планеты Земля.

1.2.1. Геохимические тупики морского дна

Подсчитано, что за все время существования нашей планеты ее атмосфера и гидросфера получили в результате извержения вулканов 2×10^{17} т углекислого газа. На сегодняшний день в Мировом океане и других водоемах его растворено 130×10^{12} т. Атмосфера содержит $2,6 \times 10^{12}$ т (0,03 %) CO₂. Разница между количеством произведенного CO₂ и современного, содержащегося в атмосфере и гидросфере, была выведена из круговорота двумя путями.

Попадая в море из атмосферы, литосферы, со стоком рек, в ходе биологических процессов, непосредственно двуокись углерода взаимодействует с водой, образуя угольную кислоту (H₂CO₃). Последняя в силу своей неустойчивости диссоциирует в морской воде на гидрокарбонатный (HCO₃⁻) и карбонатный (CO₃²⁻) ионы, а также ион водорода. После диссоциации угольной кислоты карбонатный ион (CO₃²⁻) связывается с ионами кальция в нерастворимый **CaCO₃**, который оседает на дно и образует известковые

породы. За многие миллионы лет этот **химический насос** перекачал из атмосферы в твердые морские осадки – **геохимический «тупик»**, в десятки тысяч раз больше углекислого газа, чем сейчас имеется в атмосфере.

Геохимический «тупик» снабжается углеродом и с помощью другого – **биологического насоса**. Органическое вещество, создаваемое при фотосинтезе, через пищевые цепи включается в биомассу морских растений и животных, которые после отмирания в виде детрита окисляются бактериями-гетеротрофами вновь до углекислого газа. Но это происходит не всегда. Часть детрита в виде «морского снега» – отмерших остатков морских организмов и водорослей, захороняется на дне океана, трансформируясь со временем без окисления в нефть и уголь. Их количество также во много раз превышает содержание углекислого газа в атмосфере.

Гидродинамическая модель обмена углекислым газом между атмосферой и океаном предполагает в процессе оборота углерода (углеродный цикл) неразрывную взаимосвязь океана и атмосферы по типу сообщающихся сосудов (рис.1.3), уровень которых – содержание CO_2 в системе «океан–атмосфера», всегда сбалансирован.

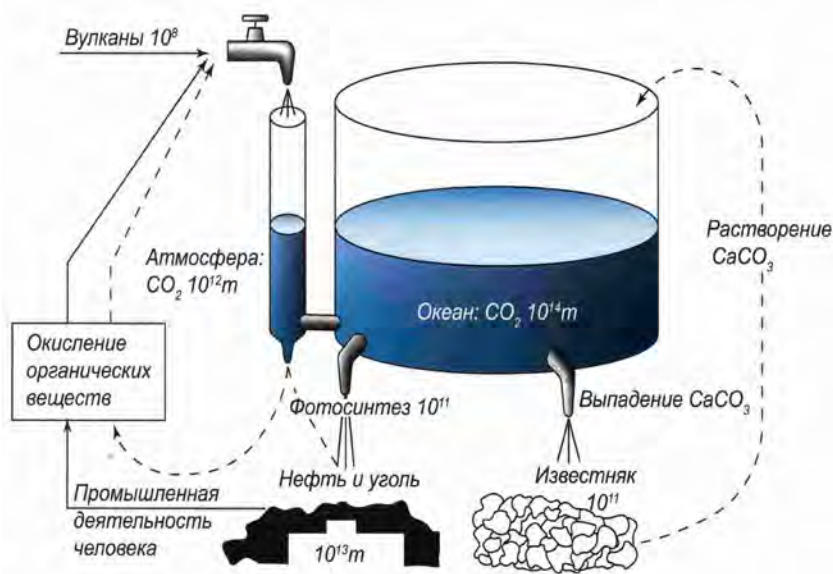


Рис. 1.3. Гидродинамическая модель обмена CO_2 между атмосферой и океаном по типу сообщающихся сосудов [Айзатулин и др., 1979].

Первые симптомы роста концентрации CO_2 в атмосфере Земли были отмечены в 30-е гг. XIX века. В 50-х гг. эти сведения подтвердились наблюдениями в Скандинавии, на Гавайских островах

и Южном полюсе. К 1984 г. стало очевидным, что концентрация углекислого газа в атмосфере Земли только за предыдущие 20 лет возросла более чем на 10 %, а за последние 200 лет – на 25 %. Если такая тенденция сохранится, то по расчетам Национальной академии наук США к 2100 г. в атмосфере нашей планеты количество CO_2 удвоится. По другим расчетам увеличение произойдет уже к середине XXI века и не в два, а в три раза.

Параллельно с ростом концентрации CO_2 в атмосфере Земли увеличивается и содержание метана – со средней скоростью 1,2 % в год. В ближайшие 50 лет количество CH_4 может увеличиться на 25–50 %, а к середине XXI века – в два раза. Также растут, но в меньшей степени, концентрации других парниковых газов – озона, закиси азота, фреонов.

Согласно концепции гидродинамической модели обмена углекислым газом между океаном и атмосферой, любое повышение концентрации CO_2 в атмосфере неизбежно приводит к компенсирующим эффектам в океане. Здесь начинают формироваться донные отложения (известняки) и полезные ископаемые (нефть, уголь, газ). В результате равновесие по углекислому газу между океаном и атмосферой восстанавливается. Таким образом, химическим и биологическим путем природа выводит избыток углекислого газа из круговорота, тем самым спасая нашу планету от катастрофы – не позволяет температуре атмосферы достичь критического уровня. По современным оценкам, например, только в 2000 г. из 9,43 Гт углекислого газа, поступившего в атмосферу в процессе хозяйственной деятельности, больше половины было «утилизировано» Мировым океаном. При этом около 3 Гт CO_2 растворилось в его водах, а 2 Гт поглотили океанические организмы. Если бы не существовало этих процессов, количество CO_2 в земной атмосфере ныне составляло бы 10^{17} т – как на Венере, где температура достигает 470°C .

1.2.2. Глобальный меж океанский конвейер

В конце XX века во многих странах активизировались исследования роли Мирового океана – важнейшего звена климатической системы Земли, в перераспределении энергии и вещества, а также механизмов и последствий крупномасштабного взаимодействия океана с атмосферой.

Анализ особенностей распределения биогенных элементов (кремния) и определение возраста глубинных вод в различных частях океанов заставили ученых изменить свои представления о масштабах и механизмах движения океанических вод. Оказалось, что кроме глобальных для каждого океана циркуляционных систем, обусловленных особенностями распределения поля давления над нашей планетой и эффектом вращения Земли (геострофические течения), тепловыми контрастами экватора и полюсов (как тепловая машина первого рода в атмосфере), в Мировом оке-

ане действует циркуляционная система планетарного масштаба, связывающая воедино воды всех океанов. Она получила название **«глобальный океанский конвейер»**, или **«океанская тепловая машина нулевого рода»** (рис. 1.4).

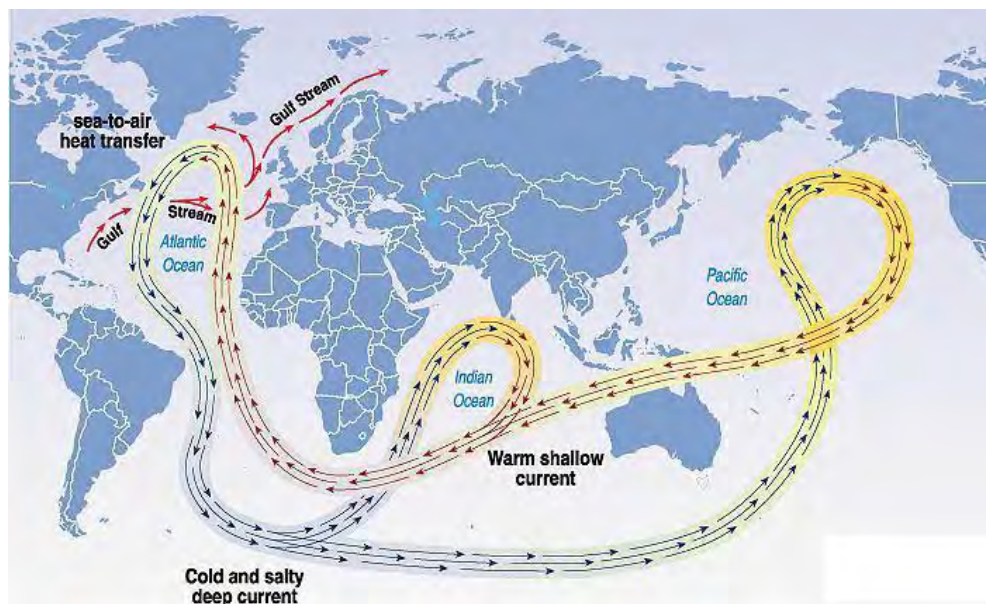


Рис. 1.4. Схема глобального меж океанского конвейера включает три океанических ячейки – замкнутых «петли».

Главный «двигатель» этого конвейера – плотностная (термохалинная) циркуляция вод, которой ранее отводилась очень скромная роль в формировании океанических течений, а о ее вкладе в изменения климата планеты только догадывались. Основным источником энергии такого плотностного меж океанского переноса были признаны аномалии солености, так как выяснилось, что эта характеристика играет определяющую роль в изменении плотности морской воды в высоких широтах Северной Атлантики. А именно здесь, оказывается, расположен «приводной ремень» всего глобального конвейера – область трансформации поверхностных вод в глубинные в процессе охлаждения и начала их движения в придонном слое к экватору. Ролью солености в этих процессах, приводящих в конце концов к долгопериодным изменениям климата, ученые ранее пренебрегали. Это дало повод известному гидрофизику профессору К. Н. Федорову (1927–1988) считать соленость «золушкой» океанологии.

Все звенья глобального океанического конвейера и механизмы его работы представляются ученым следующим образом. Средняя соленость на поверхности Мирового океана составляет 34,84 ‰, в Тихом океане она меньше – 34,56, в Индийском –

34,68, а в Атлантическом, самом соленом, – 35,30 ‰. Средняя соленость толщи вод Мирового океана (без Арктического бассейна) – 34,71 ‰ (рис. 1.5). По этому показателю самым соленым также является Атлантический океан (34,87 ‰), затем следуют Индийский (34,78) и Тихий (34,63 ‰) океаны. В Северном полушарии средняя соленость на 0,13 ‰ выше, чем в Южном. При этом средняя соленость толщи вод Атлантического океана в Северном полушарии (35,06 ‰) выше, чем в Южном (34,74 ‰), а в Тихом океане – наоборот (34,58 и 34,66 ‰ соответственно).

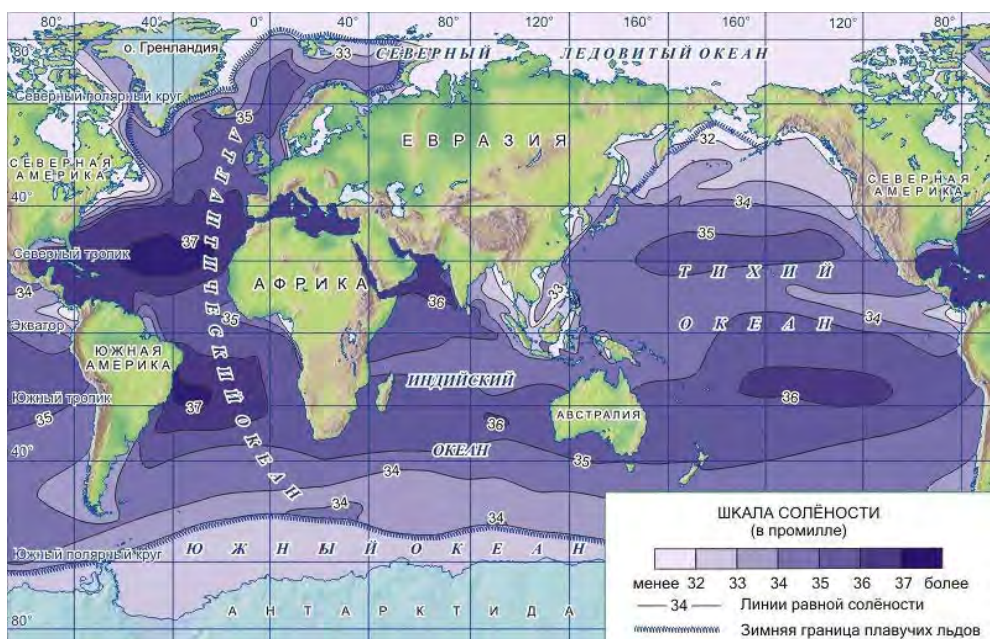


Рис. 1.5. Распределение среднегодовой солёности поверхностных вод Мирового океана.

Среднегодовая температура поверхности всего Мирового океана составляет $17,82^{\circ}\text{C}$ – на $3,6^{\circ}$ выше, чем средняя температура воздуха у поверхности Земли. В самом теплом из океанов – Тихом, она равна $19,37^{\circ}\text{C}$, в Индийском – $17,85^{\circ}\text{C}$, в Атлантическом – $17,58^{\circ}\text{C}$, а в Северном Ледовитом – минус $0,75^{\circ}\text{C}$. Самая низкая температура воды на поверхности океана – минус 2°C , самая высокая – $+36^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.6).

Средняя температура всей толщи Мирового океана от поверхности до 4000 м (без Северного Ледовитого океана) равна $3,8^{\circ}\text{C}$. В Тихом океане этот показатель составляет $3,7^{\circ}\text{C}$, в Атлантическом – $4,2^{\circ}\text{C}$ и в Индийском – $3,8^{\circ}\text{C}$. Даже на экваторе средняя температура столба воды от поверхности до дна океана составляет всего $4,9^{\circ}\text{C}$. При этом в силу высокой теплоемкости воды толща

вод Северного полушария в среднем на 2°C теплее Южного, так как максимум солнечной радиации – «**термический экватор**» по причине ассиметричного расположения материков (рис. 1.7) проходит севернее географического экватора.

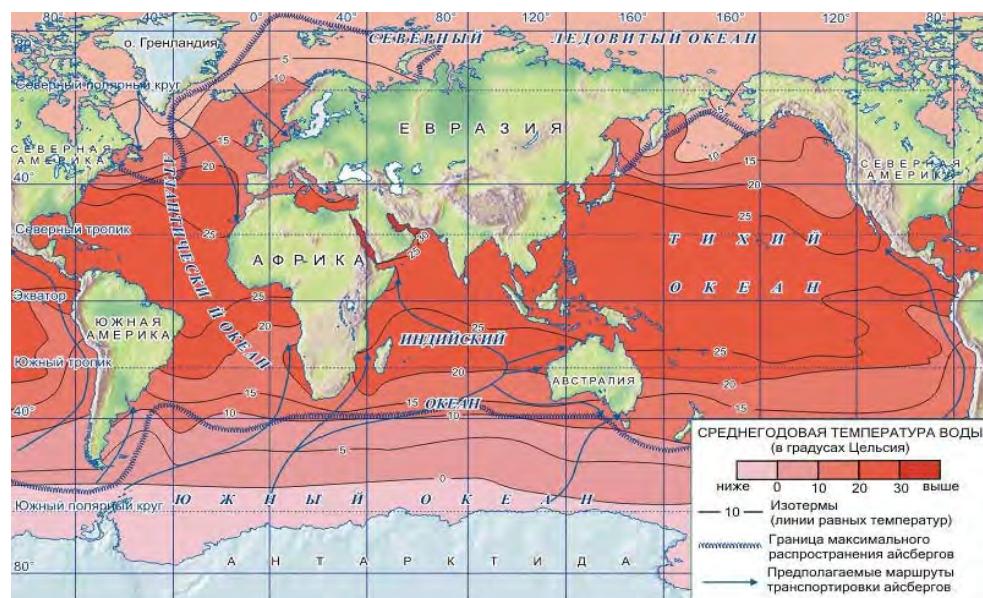


Рис. 1.6. Распределение среднегодовой температуры поверхностных вод Мирового океана.

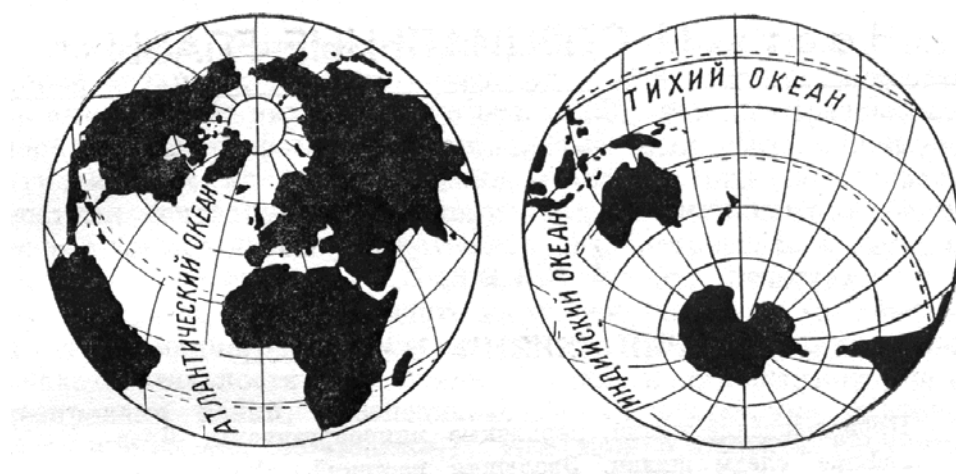


Рис. 1.7. В Северном континентальном полушарии (слева) в отличие от океанического Южного полушария (справа) материки занимают 78 % его площади.

Средний объем морского льда в океане составляет $4-5 \times 10^4$ км³, а объем льда, образующегося ежегодно, – 3×10^4 км³. При этом объем льда в Южном полушарии примерно в девять раз больше, чем в Северном. Его толщина на Антарктическом континенте достигает 3,7 км, а запас (26,7 млн. км³) составляет 76 % от общего объема льда на нашей планете (35 млн. км³).

Таким образом, средняя по объему температура (4,04° С) и соленость (34,87 ‰) атлантических вод выше, чем тихоокеанских. При этом воды Атлантики значительно теплее вод Тихого океана на глубинах (4,2 и 3,7° С соответственно) и холоднее на поверхности (17,58 и 19,4°С соответственно). Вместе с тем в силу физико-географических и климатических причин в северной части Тихого океана осадки и речной сток преобладают над испарением, а в Северной Атлантике, наоборот, испарение превышает поступление пресной воды. Именно поэтому на всех глубинах в Атлантике соленость выше, чем в Тихом океане на 1 (слой 50–500 м) и даже на 2–3 ‰ (на поверхности в умеренных и высоких широтах).

Так как плотность морской воды кроме давления зависит от температуры и солености, то из-за указанных выше глобальных различий физических свойств океанических вод в Северной Атлантике их средняя плотность (27,69 кг/м³) оказывается выше, чем на севере Тихого океана (27,40 кг/м³). В результате в придонном слое Мирового океана **формируется глубинная ветвь глобального океанского конвейера** (рис. 1.4 синяя стрелка). Градиентный поток атлантических вод, «родившийся» в северной части этого океана, распространяется на юг до Антарктики и далее следует вокруг этого континента в его Индоокеанский и Тихоокеанский сектора. Здесь плотные, хоть и сильно трансформированные, атлантические воды включаются в меридиональную циркуляцию Индийского и Тихого океанов, возникающую из-за разного прогрева их экваториальных и полярных районов (по типу тепловой машины первого рода). При этом возникают теплые ветви конвейера в Индийском и Тихом океанах.

Кроме указанных отличий физических свойств вод океанов, уровень Тихого океана как по спутниковым данным, так и по результатам наземной нивелировки на всех широтах оказался в среднем на 60 см выше, чем в Индийском и Атлантическом. В результате на поверхности Мирового океана **формируется верхняя ветвь глобального океанского конвейера** – поток вод по наклону уровня из Тихого океана через моря Зондского архипелага в Индийский и далее вокруг Южной Африки в Атлантический океан. На севере Индийского и Тихого океанов к ней присоединяются вышедшие на поверхность прогретые воды глубинных ветвей конвейера (рис. 1.4 красная стрелка).

Глубинные воды, составляющие нижнюю ветвь конвейера, проходят Атлантический океан с севера (55° с. ш.) на юг (48° ю. ш.) за 50 лет. Путь вокруг Антарктиды до Тихого океана – за 44 года, Индийский океан покоряют за 20, а Тихий – за 50 лет. При этом время их опускания на глубину в Северной Атлантике и подъем на поверхность в Индийском и Тихом океанах составляет 50 лет. Воды же поверхностной ветви конвейера оказываются значительно проворнее. Тихий океан они пересекают всего за 18 лет, Индийский – за 6, а Атлантику – за 13 лет [Анисимов и др., 2002].

Кроме того, из рисунка 1.3 следует, что глобальный конвейер состоит из трех замкнутых «петель» – океанических ячеек. Расход воды в первой из них, охватывающей Атлантический океан, часть Антарктического кольца и южные районы Индийского океана, составляет пять Свирдрупов ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ км}^3$). Вторая ячейка с расходом 3 Св такой же петлей захватывает южную часть Тихого океана, а третья самая большая по расходу (12 Св) проходит через Атлантику, Антарктическое кольцо и практически весь Тихий океан. Время полного оборота вод по этим ячейкам составляет соответственно 215, 255 и 280 лет.

«Таким образом, возникающая за счет градиентов солености и перепада уровней меж океанская циркуляция определяет тепловое взаимодействие между океаном и атмосферой», определяющее в конечном итоге колебания климата на нашей планете. Таяние ледников Гренландии может вызвать распреснение вод Северной Атлантики и «приостановить» тем самым движение ленты глобального океанического конвейера, управляющего климатом нашей планеты. Так, в период интенсивного потепления 13–10 тыс. лет назад [Чепальга, 2005] по причине распреснения вод в Северной Атлантике процесс зимней конвекции (опускание вод при охлаждении) прекратился, количество сформировавшейся здесь глубинной воды сократилось в четыре раза и глобальный океанский конвейер «отключился». В результате замедлилось поступление в этот район с юга тепла и солей и температура воздуха в приповерхностном слое за несколько десятков лет понизилась на $6\text{--}7^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, «глобальная меж океанская циркуляция может служить примером самоорганизующейся автоколебательной системы с положительной обратной связью, где главную роль играет соленость». К сожалению, в настоящее время мы еще не знаем многих физических механизмов обратных связей, обеспечивающих этот колебательный процесс.

1.3. Признаки современного потепления климата и его последствия

К концу XX века многолетние (более 100 лет) инструментальные наблюдения за климатическими характеристиками Земли позволили исследователям во всем мире сделать заключение о начале нового периода глобального потепления.

По данным Годаровского института космических исследований (США) в конце 1930-х – начале 1940-х гг. средняя приземная температура воздуха нашей планеты поднялась по сравнению с 1880-м г. на $0,6^{\circ}\text{C}$ ($\sigma = 15\%$). С 1940-го по 1960–1965 гг. она понизилась в пределах $0,3^{\circ}\text{C}$, а с 1965 г. вновь отмечено повышение температуры, достигшее максимума в 1990–1992 гг., – около 1°C по сравнению с 1860-ми гг.

За 1900–2000 гг. рост температуры воздуха над поверхностью континентов и океанов составил $0,83^{\circ}\text{C}$. При этом Северное полушарие прогрелось на $0,3^{\circ}\text{C}$ больше, чем Южное, а над континентами потепление составило $1,6^{\circ}\text{C}$ – в два раза выше, чем над морской поверхностью [Клиге, 2000].

Со второй половины 1990-х гг. положительные аномалии температуры в Северном полушарии (рис. 1.8 а) достигли максимума – $0,5\text{--}0,6^{\circ}\text{C}$ (по сравнению с периодом 1961–1990 гг.). В Южном полушарии (рис. 1.8 б) повышение средней годовой температуры воздуха с 1860-х по 1990-е гг. составило $0,8^{\circ}\text{C}$.

Из 142 лет регулярных метеорологических наблюдений десять самых жарких выпали на последнее 15-летие. При этом 1998-й, 2001-й, 2002-й гг. были наиболее теплыми, а 1998-й оказался самым теплым за весь период инструментальных наблюдений.

Современное потепление повсеместно сопровождается снижением на суше амплитуды суточных колебаний температуры в основном за счет увеличения ночных минимумов (особенно в умеренных широтах). Кроме того, во внутригодовом плане преобладает в основном зимнее потепление, а амплитуда внутригодовых колебаний температуры в высоких широтах в 3,5 раза превышает аналогичную для тропиков. Изменение приземной температуры воздуха в масштабах России и сопредельных государств имеет существенные различия (рис. 1.9).

1. После обработки данных наблюдений 455 метеостанций на территории России с 1901 по 1995 г. установлен рост за этот период среднегодовой температуры воздуха на $0,9^{\circ}\text{C}$. При этом зимой потепление составило $1,3$, а летом – $0,3^{\circ}\text{C}$ за 100 лет (рис. 1.10).

2. Максимум потепления на территории России отмечен между 50 и 55° с. ш. К югу положительные тренды приземной температуры воздуха затухают, а в районе Кавказа и Черноморского побережья они меняют знак. Не прослеживается также явного потепления за последние 100 лет в тундровой зоне России и на

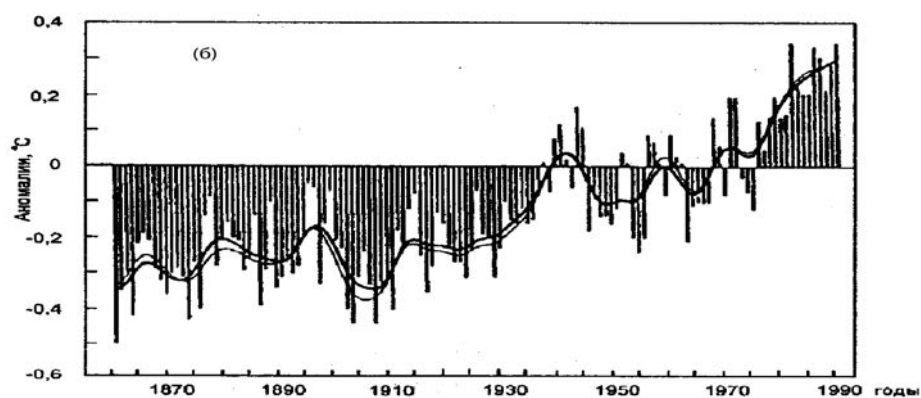
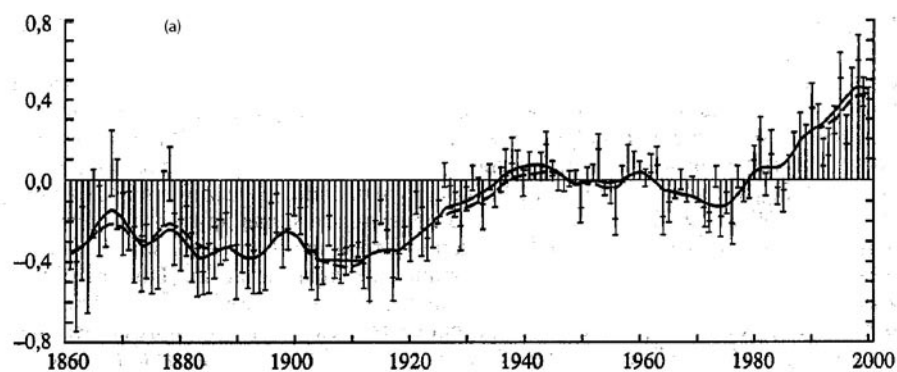


Рис. 1.8. Аномалии среднегодовой температуры воздуха в Северном (а) и Южном (б) полушариях за период 1860–2000 гг.

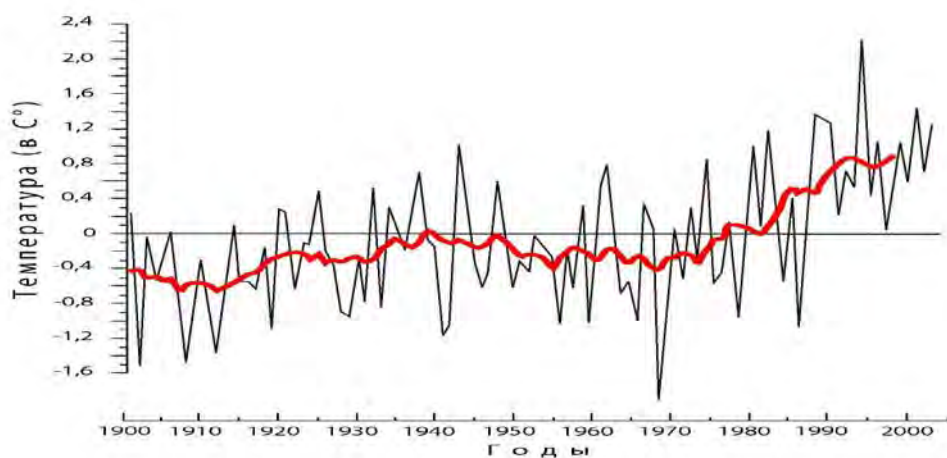


Рис. 1.9. Среднегодовые аномалии температуры воздуха на территории России за период 1901–2004 гг.
[Национальный атлас..., 2008].

Дальнем Востоке. В бассейне Волги рост среднегодовой температуры воздуха за этот период составил $1,5^{\circ}\text{C}$.

3. За 50 лет (1950–2000) скорость потепления в указанном диапазоне широт синхронно возросла на всей территории нашей страны, достигая максимума весной ($1,5^{\circ}\text{C}$). При этом самый высокий (до 1°C) рост среднегодовой приземной температуры воздуха по отдельным регионам страны отмечался в Прибайкалье, Средней и Западной Сибири, Приморье.

4. На территории Молдовы среднегодовая приземная температура воздуха с 1886 г. повысилась на $0,5^{\circ}\text{C}$, а в зимний период потепление составило $1,2^{\circ}\text{C}$. На большей части территории Украины среднегодовое потепление к концу XX века составило $0,5\text{--}1,0^{\circ}\text{C}$. При этом более существенное потепление также отмечается в холодный период года, изменяются сроки и продолжительность сезонов (зимы становятся короче).

5. Потепление на территории Грузии проявляется в основном в восточных районах страны и преимущественно в зимние месяцы (от $0,8$ до 2°C за 100 лет) с максимумом в феврале. В западных высокогорных районах и на побережье Черного моря фиксируются слабые отрицательные тренды среднегодовой приземной температуры воздуха. На территории Польши потепление с 1891 по 1990 г. составило $0,5\text{--}1,0^{\circ}\text{C}$, а в центральных областях Румынии с 1860 по 1995 г. этот показатель составил $0,2\text{--}0,4^{\circ}\text{C}$.

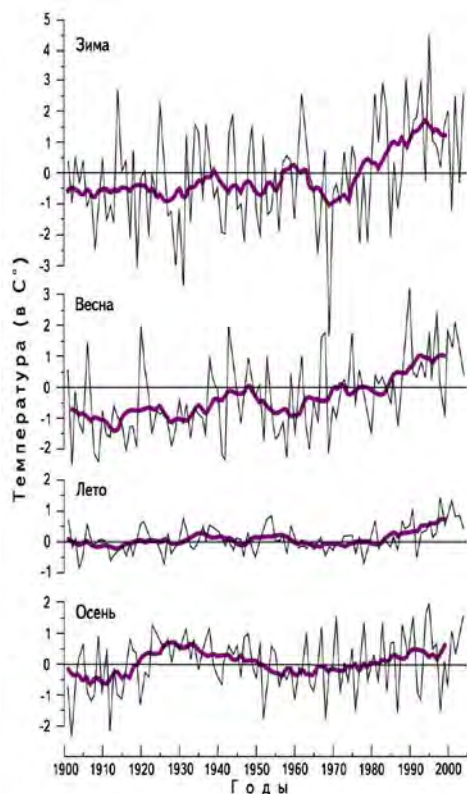


Рис. 1.10. Средние сезонные аномалии температуры воздуха на территории России за период 1901–2004 гг. [Национальный атлас..., 2008].

1.3.1. Изменение структуры и интенсивности атмосферных процессов

Увеличение контрастов температуры между поверхностью океана и суши, а также между южными и северными широтами в процессе глобального потепления могут приводить к существенным нарушениям в системе атмосферной циркуляции.

1. В течение XX столетия центр Арктического антициклона сместился к западу, а его местоположение, как известно, определяет границу кромки морских льдов в Арктике (ледовитость) и влияет, таким образом, на траектории атлантических циклонов в Северном полушарии. При сдвиге центра высокого давления (кромки льдов) к востоку циклоны движутся, минуя материк, северным путем. При более западном его положении атлантические циклоны устремляются на материк.

2. Сдвиг центра Арктического антициклона на запад повлиял на положение и мощность других квазистационарных центров давления атмосферы (ЦДА). Так, площадь Алеутской депрессии, например, за последние 100 лет возросла более чем на 6 млн. км². Исландский минимум над Атлантикой за это время сместился к юго-западу почти на 10°, а Азорский максимум – к северо-западу более чем на 6°. Разность приземного давления в их центрах на станциях Стиккисхоульмур (Исландия) и Лиссабон (Португалия), отражающая индекс североатлантического колебания (САК), в 1960–1990-х гг. существенно возросла.

Алеутский минимум и Гонолульский максимум в Тихом океане в это время сместились к северу. Динамика и мощность указанных ЦДА, а, следовательно, и состояние мировых водных ресурсов, связаны, очевидно, и с развитием явления Эль-Ниньо.

3. В результате указанного сдвига ЦДА и их интенсификации в атмосфере материков Северного полушария активизировался зональный перенос (запад-восток) воздушных масс. Суммарное количество глубоких циклонов над Европой увеличилось на 50 %. При этом над Восточной Европой за последние десять лет их годовое число возросло на 12 % (до 90 в год), а в августе и сентябре – на 31 и 38 % соответственно.

4. В условиях потепления водность атлантических и западноевропейских циклонов увеличилась за 100 лет на 35 и 18 %, а их количество – на 48 и 31 %. В Северной Атлантике за это время число ураганов и тропических циклонов увеличилось в четыре раза, а на востоке Северной Пацифики – на 30 %.

5. Из-за потепления в высоких широтах Северного полушария высотная фронтальная зона западного атмосферного переноса (струйное течение), являющаяся северной границей проникновения летних муссонов, сместилась к полюсу. Это определило увлажнение атмосферы высоких широт – более глубокое проникновение на север влажного тропического воздуха.

1.3.2. Глобальные и региональные изменения в гидросфере

Указанные термодинамические трансформации в атмосфере в процессе потепления климата привели к существенным изменениям в гидросфере планеты.

1. Испарение с океанической поверхности за период потепления

увеличилось на 4 %. Общая площадь облачного покрова над планетой с 1900 г. увеличилась почти на 10 %. При этом над Европой, Индией, Северной Америкой и Австралией эти аномалии составили 8–12 %.

II. За последние 100 лет количество осадков в среднем по планете (особенно для приокеанических склонов континентов и над островами) возросло на 3–4 %. Над континентами положительные аномалии осадков составили 200–300 мм.

III. Над Антарктидой с 1885-го по 1930-е гг. количество осадков возросло на 12 % (до 2480 км³/год). В 1930–1960-х гг. этот показатель здесь уменьшился на 18 %, а с 1985 г. наметилась тенденция к его росту.

IV. На территории России с 1950 по 1998 г. годовое количество осадков в восточных регионах незначительно снизилось, а на северо-востоке снижение составило 22 %. На европейской части страны за последние 20 лет отмечается слабый положительный тренд этого показателя, особенно в зимние месяцы (рис. 1.11).

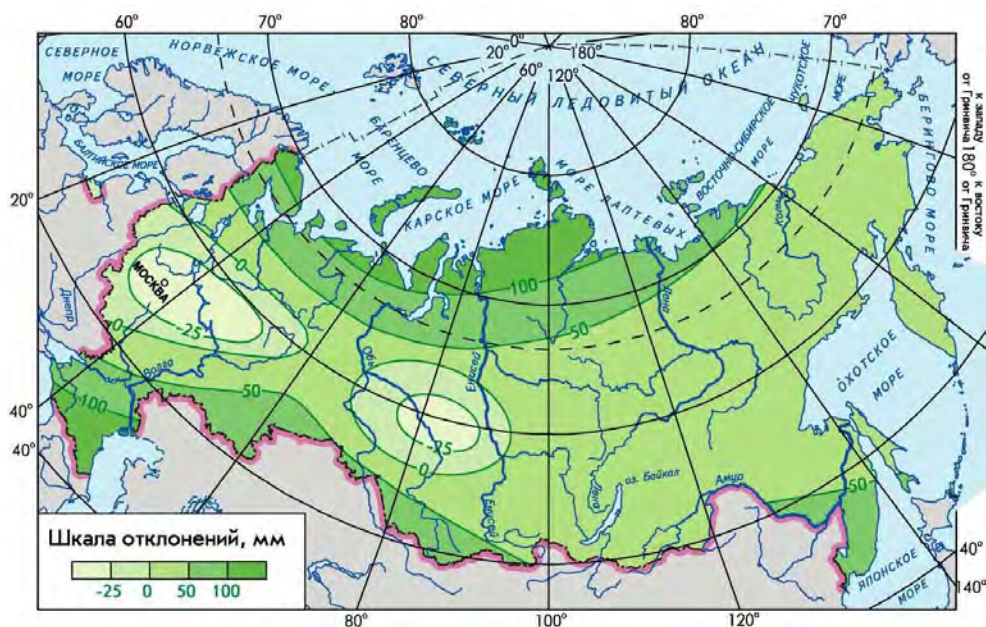


Рис. 1.11. Аномалии среднегодовой суммы осадков на территории России [Национальный атлас..., 2008].

V. За последние три года XX века (1997–1999) в мире произошло 351 наводнение (рис. 1.12). При этом их максимальное количество было в Азии (142), затем следуют Северная Америка (59), Европа (53), Африка (50), Центральная и Южная Америка (32) и Австралия с Океанией (25). По данным Дартмутской обсерватории при Ханноверском колледже (США), только в 2002 г. в мире произошло 261 значительное наводнение, из которых девять экстремальных, случающихся один раз в 100 лет.

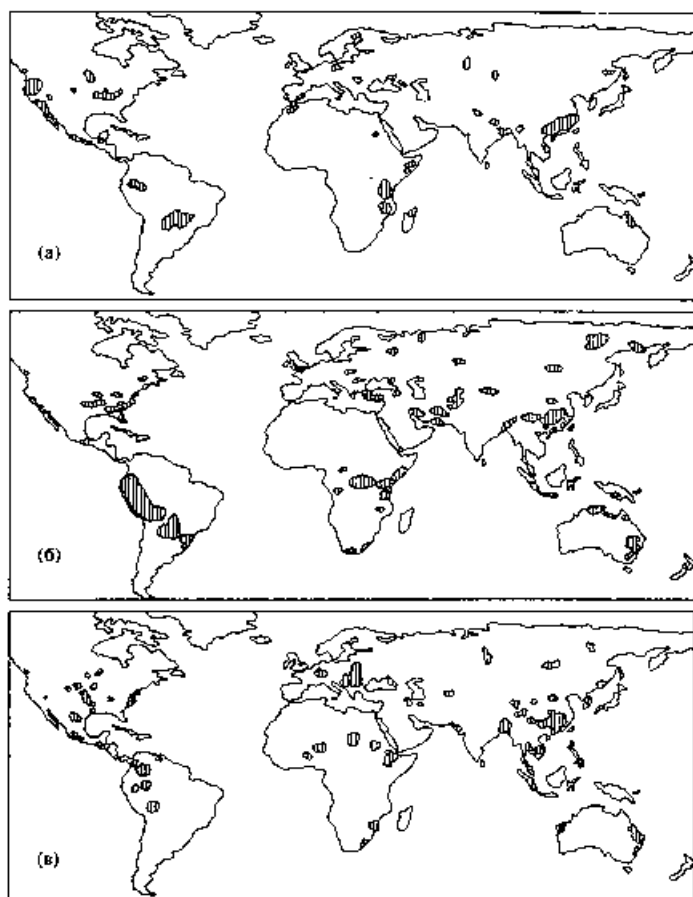


Рис. 1.12. Районы мира, пострадавшие от наводнений в 1997 (а), 1998 (б) и 1999 (в) гг. [Авакян и др., 2000].

VI. Максимум наводнений в Азии отмечается в Бангладеш на реках Ганг, Брахмапутра, Мегхна и др. Только с 1950-го по 1988-й г. здесь их было 25. Затем следует Китай – бассейны рек Янцзы и Хуанхэ. С XXI по XVI век до н. э. наводнения на р. Хуанхэ, прозванной за это «горе Китая», случались примерно раз в 50 лет, в течение II-I веков до н. э. – раз в 20 лет, а сегодня здесь фиксируют в среднем два наводнения в год.

VII. В России на юге Приморского края, в бассейнах средней и верхней Оки, верхнего Дона, на реках бассейнов Кубани и Терека, в бассейне Тобола, на притоках среднего Енисея и средней Лены наводнения случаются чаще, чем один раз в два года (рис. 1.13). Общая площадь паводкоопасных территорий в стране составляет 400 тыс. км², из которых ежегодно 1/8 часть (50 тыс. км²) затапливается. Наводнения с катастрофическими последствиями отмечаются на территории 150 тыс. км², где расположены 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, семь млн. гектаров сельхозугодий.

VIII. В 2001 г. на территории России отмечено 23 наводнения, принесших огромные убытки и человеческие жертвы в Приморье, Якутии, Бурятии, Иркутской, Оренбургской, Челябинской, Курганской областях. Только в первом полугодии 2002 г. их было уже 19 и на территориях 44-х субъектов Российской Федерации. В июне 2002 г. в Южном федеральном округе в результате сильных ливневых дождей в горах Северного Кавказа (бассейны рек Кубань, Терек, Кума, Сулак, Самур) наводнения отмечались на территории девяти субъектов Федерации (рис. 1.14).

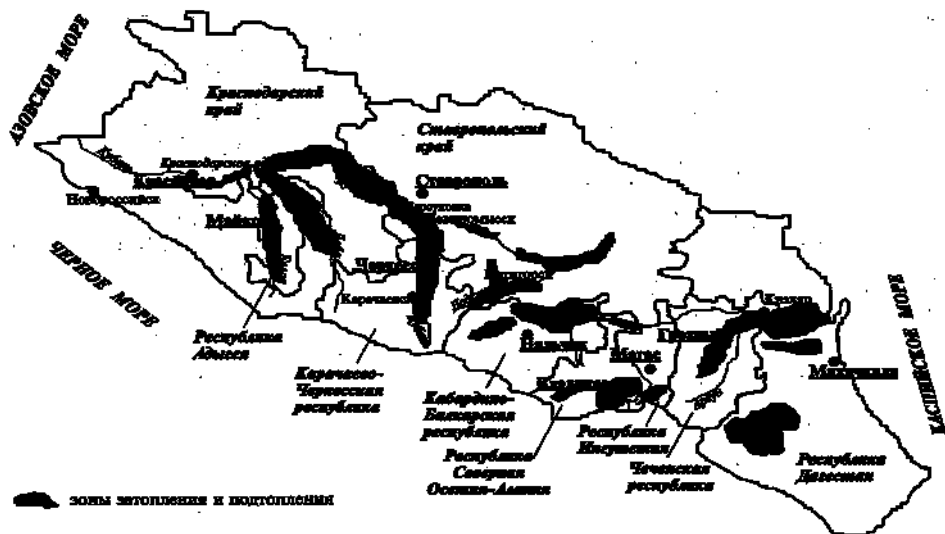


Рис. 1.14. Субъекты Российской Федерации, пострадавшие от наводнения на юге России летом 2002 г.
[Воробьев и др., 2003].

IX. В последнюю четверть XX века возросла повторяемость не-вских наводнений в Санкт-Петербурге, связанных с ветровыми на-гонами (ряд наблюдений с 1703 г.). В 2001–2002 гг. здесь произо-шло четыре случая выхода Невы из берегов (один – до уровня выше 200 см ординара). Во время Эль-Ниньо 1982–1983 гг. в Ленинграде было зафиксировано 13 наводнений – максимум за всю историю существования города.

X. В августе–сентябре 2002 г. проливные дожди обрушились на Центральную Европу, вызвав здесь каскад катастрофических небы-валых за последние 100 лет наводнений на реках Чехии (Влтава, Лаба, Огржа, Хомутовка, Тепла), Словакии (Дунай, Грон), Австрии (Дунай, Камп, Инн), Германии (Эльба, Рейн, Траун, Пляйссе, Мульда, Инн, Молдау), Венгрии (Дунай и притоки) (рис. 1.15). Уровень рек в Чехии поднимался на 10–12, а в р. Лаба – на 13 м, в реках Германии он превышал норму в четыре раза. Уровень Дуная в Австрии в окрест-ностях Вены поднялся до рекордной за последние 112 лет отметки 10,5 м, в Германии у города Пассау (Бавария) он достиг 10,7 м.



Рис. 1.15. Зоны наводнений в странах Центральной Европы, август 2002 г. [Воробьев и др., 2003].

XI. При Эль-Ниньо 1997–1998 гг. водные ресурсы России превышали норму на 5–9 %. Между этими периодами на территории России зафиксировано увеличение речного стока в Центральном (19 %), Волго-Вятском (15), Северо-Западном (14), Северном (6), Дальневосточном (3) и Восточно-Сибирском (2 %) регионах. Сток рек Западной Сибири и Северного Кавказа при этом был в пределах нормы, а в Центрально-Черноземном районе превышал ее на 7 %.

XII. С 1880 по 1940 гг. в среднем внутриконтинентальный речной сток сократился на 20 %, а на островах возрос на 12 %. В 1940–1945 гг. сток рек земного шара был минимальным за последние 100 лет. В это время его величины на всех континентах, кроме Южной Америки, были ниже среднегодовое на 4 %. Только на Тихоокеанском склоне Южной Америки, Индоокеанском и Средиземноморском склонах Азии величины речного стока превышали средние значения. С конца 1960-х гг. суммарный речной сток, а также поверхностный и подземный стоки континентов стали возрастать.

XIII. С 1884 по 1995 г. масса горных ледников на континентах сократилась на 5 % (1886 км³). В целом по планете общее оледенение (30 млн. км³) в настоящее время сокращается на 400 км³/год (из них ледники Антарктиды – на 300 км³/год, ледники островов Арктики без Гренландии – на 6 км³).

XIV. С 1972 по 1996 г. площадь ежегодного снежного покрова в Северном полушарии сократилась на 2 млн. км².

XV. В результате этих процессов в настоящее время объем вод Мирового океана увеличивается ежегодно на 610 км³, а его уровень с 1860 по 1996 г. повысился на 20 см. Средняя скорость роста уровня составляет 1,5 мм/год.

XVI. Кроме того, с 1874 по 1993 г. высота приливов на Атлантическом побережье Европы увеличилась на 30 см. Средняя скорость ее роста составляет 2,44 мм/год.

1.3.3. Механизм возникновения катастрофических наводнений

Исследуя возможные причины роста повторяемости на планете катастрофических наводнений, математики Института водных проблем РАН и механико-математического факультета МГУ проанализировали статистику этих явлений и пришли к заключению, что одна из причин роста их повторяемости может состоять в том, что до сих пор не верно оценивалась (занижалась) вероятность катастроф. Полагая, что интенсивность наводнений экспоненциально зависит от сочетания суммы гидрометеорологических факторов, этот показатель рассчитывался по законам линейного (гаусовского) распределения – по уравнениям первого порядка. В результате вероятность катастроф получалась ничтожно малой.

После анализа статистической информации о крупнейших наводнениях было установлено, что временные ряды, например, масштабов убытков, количества жертв катастроф, обладают аномальными свойствами: сумма элементов всего ряда, в отличие от рядов с нормальным распределением, имеет тот же порядок, что и максимальный элемент ряда. Например, при катастрофическом наводнении на р. Янцзы в 1931 г. погибло 1,3 млн. человек – почти столько же, сколько при всех остальных наводнениях, случившихся в это же время в Китае, а материальный ущерб от наводнения 2002 г. на Северном Кавказе гораздо выше, чем суммарный ущерб за десятки предыдущих наводнений.

Математикам известно, что для таких временных рядов вероятность исследуемого явления распределяется не по линейному, а по степенному закону с так называемым «тяжелым хвостом» (распределение Парето), который отражает гипотетические катастрофические наводнения, возможность которых линейные уравнения не учитывают. Таким образом, вероятность катастроф, рассчитанная в этом случае, получается на порядок и более выше, рассчитанной по экспоненциальному (линейному) распределению.

Физический механизм возникновения такого распределения в статистике наводнений ученые пока объяснить не могут. Тем не менее при исследовании гидрологических процессов, связанных с этими явлениями, были предложены гипотезы о физических причинах возникновения коварных «тяжелых хвостов». Анализируя составляющие водного баланса (влагозапаса) речного бассейна – осадки, испарение, речной сток и их колебания во времени, ученые обратили внимание на то, что, например, не только речной сток влияет на влагозапас бассейна, но и сам влагозапас влияет на сток. Между этими величинами существует обратная связь – предполагаемый источник нелинейности. Ее суть состоит в том,

что в бассейне с большим влагозапасом (почвенных, подземных вод, озер, болот) не только выше потенциальная энергия этих вод, но и значительно меньше расход энергии воды при ее движении, например, при фильтрации в почву. Вспомните, вытереть лужу влажной тряпкой гораздо проще, чем сухой.

В результате такого синхронного роста потенциальной энергии воды и снижения сопротивления ее движению в увлажненном бассейне наблюдается нелинейный рост расходов воды. Это проявляется в том, что, например, после обильных дождей в реку попадают не только выпавшие сегодня осадки, но и воды, накопившиеся в почве после предыдущих дождей, но из-за большого сопротивления трения не достигшие реки. Таким образом, гидрофизические процессы на водосборе, в которых участвуют осадки предыдущих времен, создают «тяжелый хвост» нелинейного распределения стока, хотя характер распределения фактических осадков остается нормальным. «Математическая формализация этого известного гидрологического явления и дает в итоге степенные законы вероятностей паводков и наводнений».

Пересчет вероятностей известных катастроф с рассмотренных позиций их нелинейного распределения дал ошеломляющие результаты. Знаменитое Санкт-Петербургское наводнение 19 ноября 1824 г., при котором уровень воды в Неве на 421 см превысил среднемноголетний, оказывается могло случиться не раз в 20 тыс. лет, как полагали ранее, а всего один раз в 667 лет (!). Аналогичная катастрофа на Неве 23 сентября 1924 г., ранее считавшаяся возможной раз в 3000 лет, с учетом «тяжелого хвоста» может случаться раз в 256 лет.

Вероятность наводнения 1954 г. на р. Янцзы в Китае в четыре раза выше (раз в 167, а не в 667 лет), чем рассчитанная традиционным методом. Наводнение на р. Миссури в 1951 г. могло случиться один раз не за 181, а всего за 38 лет; половодье на р. Западная Двина в 1931 г. – не за 526, а за 88 лет. Разливы р. Кубань в 2002 г. следовало ожидать не раз в 1000, а раз в 170 лет. Терек «шалит» с периодом не 406, а 110 лет. Сток р. Кумы превышает норму в пять раз (как в 2002 г.) не через каждые 28000 лет (!), а один раз за 85 лет, в р. Подкумка это происходит не через 8800 (!), а раз в 102 года. Наконец, катастрофа, случившаяся на р. Эльба в июле 2002 г., когда ее уровень в три раза превысил норму, могла произойти один раз не в 1000, а в 100 лет. Таким образом, современные статистические оценки дают основание ученым полагать, что «катастрофические наводнения, происходящие на нашей планете, не являются из ряда вон выходящими событиями, а имеют достаточно большую вероятность, и с этой вероятностью необходимо считаться».

В этой связи проблема потепления климата лишается одного из наиболее веских аргументов, хотя другие факты, подтверждающие этот процесс, не позволяют снять с повестки дня вопрос, что же явилось его причиной – природа или человек?

1.4. Реакция морских экосистем на климатические колебания речного стока (на примере Каспийского моря)

Античная история сохранила сведения о том, что после смерти Александра Македонского (323 г. до н. э.) флот его полководца Патрокла, обследуя завоеванный южный берег Каспийского (по-древнегречески – Гирканского) моря, впервые обнаружил следы его соединения с Азовским через Кума-Маньчскую впадину. Действительно, сегодня в новой истории Каспия ученые отмечают несколько периодов продолжительных трансгрессий моря, после которых оно на долгие годы соединялось с Мировым океаном (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Палереоконструкция связи Понто-Каспийских бассейнов в позднеледниковье и голоцене [Чепалыга, 2002]. 17–15 тыс. лет назад в результате потепления климата площадь Раннехвалынского бассейна (древнего Каспийского) увеличилась на 6 млн. км², через Маньч-Керченский пролив Каспий соединялся с Черным морем, а Аральское море через древний пролив Узбой соединялось с Каспием.

Кроме долгопериодных наступлений моря на сушу за последние 25 тыс. лет в бассейне Каспия зафиксировано 15 случаев более мелких морских трансгрессий, длившихся от 40 до 380 лет каждая. Существует предание, согласно которому в I веке до н. э. Апшеронский полуостров соединялся с островом Артем. На острове,

носившем до революции название Святой-Пир-Аллахир («божий храм»), находился храм огнепоклонников, где на поклонение огненным газовым факелам, вырывающимся из глубин земли через многочисленные трещины, собирались жители всего полуострова.

Известный ученый-этнограф А. Н. Гумилев связывает с подъемом уровня Каспия в X веке гибель могущественного Хазарского каганата. Итальянский географ Марино Сануто свидетельствовал в начале XIV века о подъеме уровня моря на 13 м за 90 лет и на своей карте, выпущенной в 1320 г., в западном углу отметил: «Море каждый год прибывает на одну ладонь, и уже многие хорошие города затоплены». По свидетельству персидского писателя Наджати, в 1304 г. порт Абескун на юго-восточном берегу Каспия поглотило море. Та же участь постигла ряд поселений провинции Гилян на побережье Ирана. В 1400 г. азербайджанский ученый и писатель Бакуви констатировал, что вода дошла до стен бакинской крепости. Кстати, по многим источникам, в этот период Амударья впадала не в Арал, а в Каспий.

Таким образом, на протяжении всего четвертичного периода Пракаспийское море было солоновато-водным, опресненным, бессточным водоемом, периодически соединявшимся с Черным. При этом в моменты трансгрессий его площадь возрастала по сравнению с современной в 2,5 раза, а уровень повышался на 80 м выше современной отметки, достигая абсолютной отметки плюс 50 м. В период регрессий уровень моря опускался до абсолютной отметки минус 150 м. При этом колебания солёности не превышали 6–8 ‰. В то время, когда в Черном море солёность изменялась от 2–4 ‰ (Новоэвксинское море-озеро) до 30 ‰ (Карагангатский бассейн).

Одним из самых показательных примеров неразрывной связи климатических, атмосферных, гидрологических и океанологических процессов в системе «атмосфера–гидросфера» является стремительная динамика условий среды Каспийского моря, начавшаяся во второй половине XX века и продолжающаяся в настоящее время. Некоторые наиболее характерные ее признаки выглядят следующим образом.

1.4.1. Современная динамика уровня моря

Характерной чертой динамики уровня Каспия за последние 10 тыс. лет была периодическая смена периодов подъема и опускания (рис. 1.17).

При этом продолжительные (более 1000 лет) периоды регрессии включали отдельные более кратковременные этапы понижения уровня. Так, например, самая древняя фаза мангышлакской регрессионной эпохи – «50-метровая», датируется возрастом 10 тыс. лет. Вторая – «70-метровая», когда уровень моря опускался до отметок минус 62–77 м абс., имеет радиоуглеродную датировку 9,3 тыс. лет, а самая

молодая – «90-метровая», случилась 8,5–9 тыс. лет назад. В этот период уровень моря опускался до отметок минус 87–98 м абс. высоты.

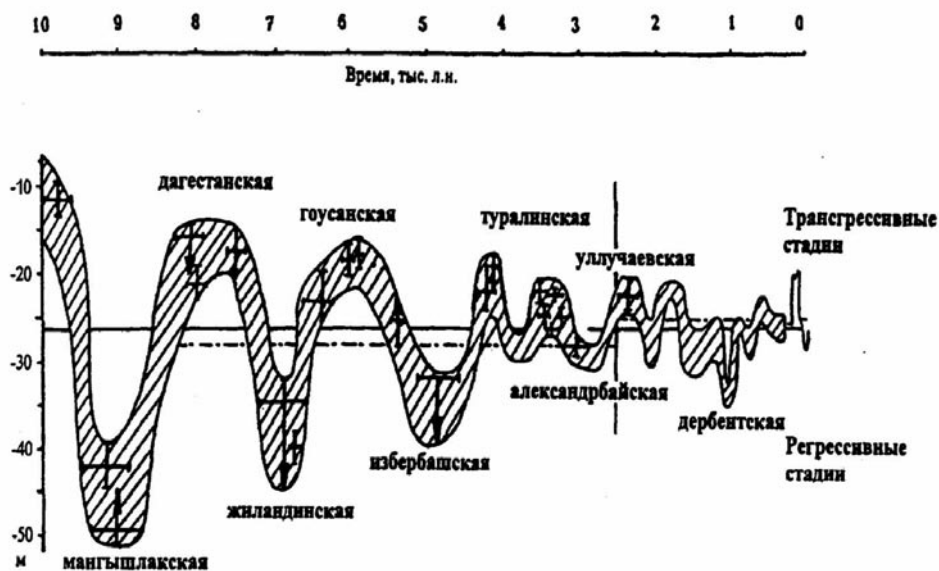


Рис. 1.17. Колебания уровня Каспийского моря в голоцене – последние 10 тыс. лет [Каплин и др., 1999].

Полевые исследования, анализ крупномасштабных топографических и аэрофотоснимков, а также тахеометрическое нивелирование современных и древних морских террас Кавказского побережья Каспия, выполненные параллельно с определением абсолютного возраста слагающих их осадков, позволили заключить, что тектонические движения не могли быть причиной таких частых и разнонаправленных колебаний уровня моря. Геодезическими и уровнемерными измерениями установлено, что величина годовых положительных и отрицательных колебаний уровня Каспия ($\pm 30 - 40$ см) в пять-шесть раз, а средняя за десятилетие ($\pm 14 - 16$ см) более чем в десять раз превышает скорости современных тектонических движений за эти же сроки, составляющие 5–7 и 1 см/год соответственно.

В то же время в течение последних 2000 лет между изменениями уровня Каспия и составляющими его водного баланса, восстановленными по палеогеографическим данным и оцененными современными инструментальными наблюдениями, установлена четкая связь (рис. 1.18). Это свидетельствует о том, что их природа состоит в изменении климатических условий в бассейне моря и над его акваторией.

С 1809 по 1930 г. происходило постепенное снижение у. м. (4,1 см/год), а в 1930–1942 гг. оно было катастрофическим (20 см/год). В 1956 г. уровень стал на 2,5 м ниже, чем в 1929 г. С 1942 по 1970 г. его снижение замедлилось. В районе Баку море отступило за десять лет на 150 м. Акватория Каспия сокра-

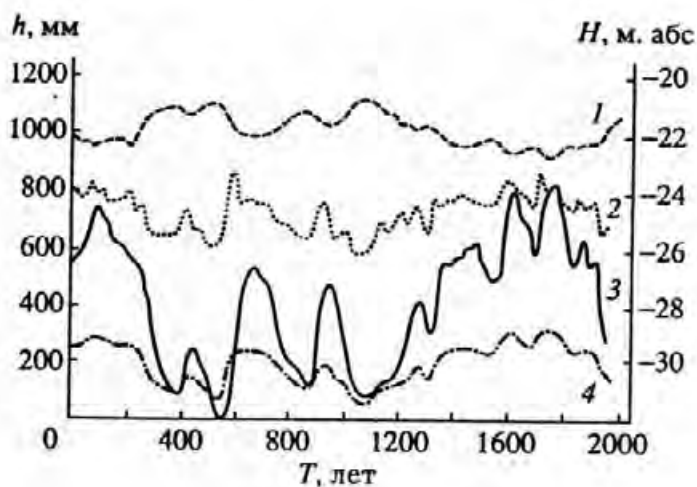


Рис. 1.18. Динамика составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря за последние 2000 лет [Клиге, 1980].
1– испарение; 2– атмосферные осадки; 3– уровень моря;
4– суммарный сток рек.

тилась на 40 тыс. км². В 1970–1978 гг. скорость понижения у. м. вновь возросла, к 1977 г. он снизился до отметки минус 29 м абс. – на 3 м ниже, чем в начале века (рис. 1.19).

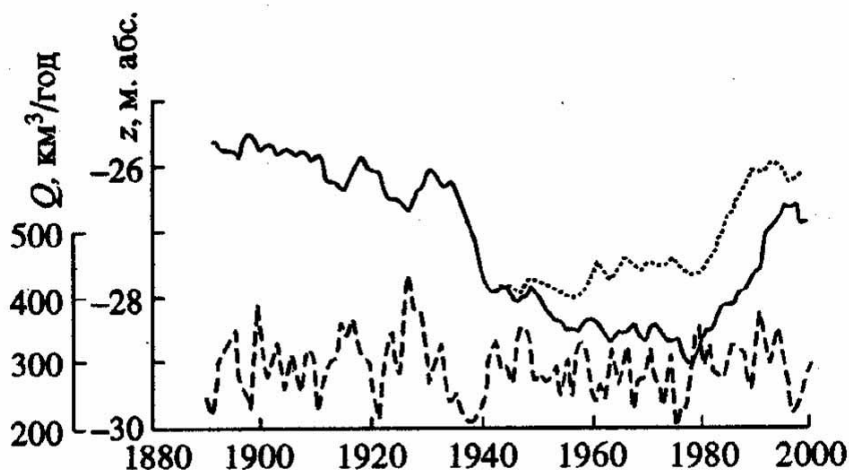


Рис. 1.19. Изменения уровня Каспийского моря (сплошная и точечная кривые) и колебания стока Волги в водоем (штриховая). Сплошная кривая – уровень, определенный по данным инструментальных наблюдений; точечная – уровень, восстановленный при условии, что потребление воды в бассейне осталось таким же, как в 1930-х гг.

С 1978 г. уровень Каспийского моря стал устойчиво подниматься (в среднем на 12 см/год), а к 1987 г. он превысил отметку десятилетней давности на 1,24 м. Средняя скорость размыва и затопления берега в различных районах Дагестана изменялась от 25 до 200 м/год. В 1979 и 1981 гг. скорость подъема уровня была максимальной и составляла 30 и 26 см/год. К концу 1995 г. среднегодовая отметка уровня Каспия поднялась до -26,6 м абс. Только к середине 1990-х гг. стремительный подъем у. м. прекратился, а в 1996 г. он уже понизился на 15 см. В 1997 г. эта тенденция закрепились. Очевидно, уровенный режим Каспия в ближайшем будущем стабилизируется.

В 1961 г. известный советский гидролог Г. К. Ижевский показал, что гидрометеорологический режим гигантской Европейско-Азиатской водной системы, в которую входят Каспийское, Черное и Азовское моря, в значительной мере зависит от интенсивности процессов, протекающих в других районах Северного полушария и прежде всего в Северной Атлантике. В конце 1980-х гг. на основании исследования этой концепции – принципа «всемирной погоды», было установлено, что перед подъемом уровня Каспия давление над Гренландией, Аляской и западным побережьем Северной Америки возрастает. В северных широтах, таким образом, устанавливается антициклонический тип погоды. В атмосфере этих районов развивается своего рода «воздушный гребень», препятствующий западному переносу. Поэтому основные поставщики влаги – атлантические и западноевропейские циклоны, вынуждены сместить свои традиционные траектории движения, на юг вглубь континента. С 1976 г. их число над территорией Каспийского бассейна возросло на 48 и 33 %, а водность увеличилась на 35 и 18 % для атлантических и западноевропейских соответственно. Это и вызвало увеличение облачности, количества атмосферных осадков и, как следствие, речного стока и подъем уровня моря.

При подъеме уровня Каспия в 1977–1996 гг. сток Волги составлял в отдельные годы более 300 км³ в год – на 20 % выше нормы. Ежегодно в водоем поступало более 350 км³ пресной воды – на 52 км³ больше, чем испарялось и уходило в залив Кара-Богаз-Гол. Этот залив, кстати, в период подъема уровня поглощал до 40 км³ воды и вместе с расходами воды на орошение (тоже около 40 км³ в год) оказывался своего рода демпфером каспийского наводнения.

Перед понижением уровня моря в атмосфере наблюдается обратная картина. К северу от 50° с. ш. давление начинает падать. В этих широтах развивается интенсивная циклоническая деятельность. На уровне моря падение давления наиболее заметно в районе Исландского центра действия атмосферы (минимума), а на высотах – над Гренландией. Такая активизация общей циркуляции атмосферы приводит к усилению западного переноса над Северной Атлантикой. Теплые «мокрые» циклоны направляются по более северным трассам. Климат Арктики становится значительно теплее, зато центральные части континента остаются без влаги. Это, естественно, сказывается на уровне Каспийского моря. Так, в период его понижения, в 1930–1940 гг., сток Волги был на 30 % ниже нормы и составлял всего 174 км³ при среднемноголетнем значении

254 км³. Волга по климатическим причинам недодавала Каспию по 800 км³ воды в год, что эквивалентно почти двухметровому слою воды в море.

1.4.2. Активизация анаэробных процессов

В глубоководной части Каспийского моря выделены четыре области с наблюдавшимся в XX веке периодическим появлением анаэробных зон в придонном слое. В начале 1920-х гг. в среднем Каспии на горизонтах >400–500 м содержание O₂ не превышало 2 мл/л, а в придонном слое (700–900 м) он, как правило, отсутствовал. Это объяснялось особенностью стратификации каспийских вод и наличием верхнего распресненного слоя, затрудняющих аэрацию глубинных вод. В этот период уровень был близок к отметке –26,2 м абс.

Резкое понижение уровня в 1930-х гг. сопровождалось повышением солености поверхностных вод и активизацией их вертикального перемешивания (особенно зимой). К 1950-м гг., когда уровень достиг отметки –27,6 м абс., анаэробные зоны в глубинной части моря исчезли. Дальнейшее его понижение, продолжавшееся до 1977 г., сопровождалось насыщением придонных вод O₂. Начавшийся в 1978 г. подъем уровня Каспийского моря ухудшил условия аэрации его глубинных вод. Летом 1975 г. содержание O₂ у дна на глубинах 700–800 м в среднем Каспии было не менее 1,9 мл/л, в 1985–1995 гг. оно снизилось до 0,8–1,3 мл/л. В западной части южного Каспия с 1986 г. гипоксия распространилась с глубины 120 м на всю глубоководную впадину. В 1995 г. здесь у дна (996 м) O₂ обнаружен не был, в 1996 г. из 56 проб грунта, отобранных в этом районе, в 43-х присутствовал сероводород. В 2001 г. в глубоководных котловинах среднего (700 м) и южного (900 м) Каспия содержание O₂ соответственно составляло 0,7 и 0,14 мл/л. В 2002 г. в среднем Каспии оно сохранилось, а в южном снизилось до 0,35–0,4 мл/л (рис.1.20).

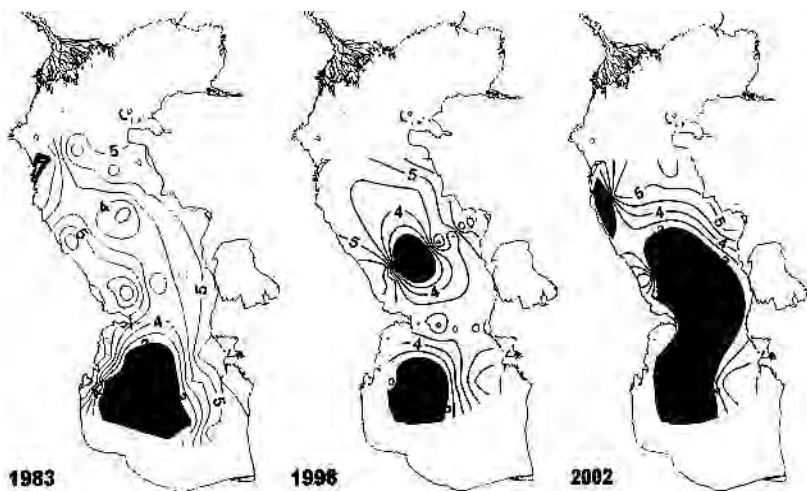


Рис. 1.20. Распределение кислорода (мл/л) и зон гипоксии (черная штриховка O₂ < 3 мл/л) в придонном слое вод Каспийского моря [Сапожников и др., 2003].

1.4.3. Экологические последствия колебаний уровня Каспия

Колебания уровня морского водоема отражаются не только на его физико-географических характеристиках – площади акватории, орографии берегов, батиметрии дна и его геолого-геоморфологических особенностях. Не менее существенным образом этот процесс отражается на природе речных дельт и приустьевых районов моря, площади и характере их гидрографической сети, морфологической структуре дна, особенностях жизнедеятельности их обитателей. Так, при понижении у. м. реки врезаются в обсохшие участки морского дна, а при повышении море проникает в ранее выработанные долины и заполняет их осадками.

В результате компьютерной обработки спутниковых снимков побережья Калмыкии, дельт рр. Урал, Терек, Сулак, Кура удалось выяснить, что наиболее типичными проявлениями подъема у. м. в устьевых районах рек, впадающих в Каспийское море, оказываются: затопление низких периферийных частей; волновая абразия нового более глубокого берегового склона и формирование здесь кос из материала абразии; формирование барьерно-лагунного комплекса; перестройка гидрографической сети.

Так, за период наступления моря 1978–1991 гг. в южной части Калмыцкого побережья Каспия береговая линия сместилась на 1–3 км вглубь материка, а полоса ветровой тростниковой осушки расширилась в сторону суши с 1–2 до 6–10 км. В тылу осушки образовалась лагуна шириной 1–2 км. На побережье возникла зона затопления шириной до 3 км, но после стабилизации уровня (1997 г.) лагуна и тростник в тылу осушки исчезли, а на берегу тростниковые заросли стали замещаться солончаковыми лугами.

В дельте Урала за 1977–1995 гг. в результате затопления ее периферийной части вдоль берега возник тростниковый пояс шириной 15–30 км, а сама береговая линия сместилась в сторону суши на 3–5 км. Ранее высохшие речные русла заполнились водой, а в тылу тростникового пояса возникла лагуна шириной 3–5 км.

В устье Терека в 1977 г. в результате затопления сухой заросший тростником Аграханский залив заполнился водой, а на восточном берегу одноименного полуострова возникла «новая» дельта реки, выступавшая в море на 400 м. К 1992 г. она выдвинулась в море на 1,8, а к 2002 г. – на 2,3 км.

В устье Сулака в период подъема у. м. сложная речная дельта была по большей части затоплена. Ее восточный берег был полностью размыт волнами – его линия отступила на 1 км к западу. Сулакская коса стала короче на 4 км. Площадь дельты сократилась на 34 % – с 70,6 до 46,6 км², но после стабилизации уровня Сулакская коса вновь выросла до 12 км и присоединилась к берегу Аграханского полуострова.

В 1978 г. площадь дельты Куры составляла 189 км², а ее длина – 30 км. К 1993 г. ее длина в результате затопления сократилась до 10 км, а площадь уменьшилась на 41 % и составила 111 км². При этом речные воды прорвались через правый берег основного

рукава реки и повернули на юго-запад. Бывшее юго-восточное русло отмерло и заросло тростником. После стабилизации и незначительного снижения у. м. в 1995–2001 гг. площадь дельты вновь увеличилась на 25 км², а в море вблизи бывшего юго-восточного устья сформировалась новая коса длиной 3 км.

По причине значительных размеров взморья и сложной макроструктуры дельты Волги аналогичные исследования характера их трансформаций под влиянием изменений у. м. пока не проведены. Тем не менее с помощью методов дистанционного зондирования удалось оценить изменения гидродинамических характеристик этих районов – направления и скорости стоковых течений в периоды повышения и последующей стабилизации у. м.

Площадь мелководного взморья р. Волга даже при экстремально низких у. м. 1975–1978 гг. составляла более 10 тыс. км². Здесь проходят три судоходных, восемь магистральных рыбоходных и пятнадцать подводных каналов, пропускающих до 30 % стока в межень и до 10 % – в половодье. Остальная часть стока проходит через взморье в виде обособленных струйных стоковых течений, характеристики которых в значительной степени зависят от физико-географических особенностей взморья, которые, в свою очередь, как было показано выше на примере малых рек водосбора Каспия, во многом определяются положением уровня моря.

Морская граница мелководного взморья Волги устанавливается по границе зоны схождения речных струй и морских вдольбереговых течений. Здесь скорость стоковых течений падает, а направление меняется на соответствующее вдольбереговому морскому течению. При низких у. м. (от -29 до -28,2 м абс. в.) площадь, занятая стоковыми течениями в половодье, составляет 3,6 тыс. км², или 35 % площади взморья Волги. При повышении у. м. до отметок минус 28,2 – 26,7 м абс. в. величина площади акватории, занятой стоковыми течениями, увеличилась в разных районах дельты на 8–30 % (Гандуринский и Никитинский районы взморья соответственно).

Перечисленные явления нарушают условия обитания и миграции многих видов птиц, изменяют условия нагула и миграции проходных и полупроходных рыб, а также других морских обитателей, сказываются на режиме поступления в море и трансформации здесь биогенных элементов, интенсивности продукционно-деструкционных процессов в водоеме, определяющих в конечном итоге уровень его биологической продуктивности.

1.4.4. Народно-хозяйственные последствия новейшей трансгрессии Каспийского моря

На землях, осушившихся в период снижения уровня Каспия (1929–1977 гг.), началось активное развитие нефтепромыслов и соответствующей инфраструктуры, характерной для промышленных регионов: разветвленной сети транспортно-энергетических и коммунально-бытовых коммуникаций (дорог, линий электропе-

редачи, водопроводов, нефте- и газопроводов), жилых домов и объектов культурно-бытового назначения. В результате анализа натурных данных со стационарных наземных полигонов, данных сети гидрометеорологических и биосферных наблюдений, а также материалов дешифрирования снимков и полевых обследований ключевых участков удалось, например, установить, что на обследованном северо-восточном побережья Каспия (22 тыс. км²) площадь участков с не нарушенными человеком ландшафтами сократилась за указанный период на 40 % – с 16 до 7 тыс. км², а на некоторых участках территории антропогенные объекты занимают сегодня до 70 % площади. При этом скорость уничтожения природных ландшафтов увеличилась со 170 до 220 км²/год.

Новейшая трансгрессия Каспийского моря, начавшаяся в 1978 г., продолжалась 18 лет. Ее последствия для дельты Волги, Волго-Ахтубинской поймы и побережья северного Каспия в пределах 200–500 км от берега моря установлены по результатам дистанционного мониторинга (разрешение от 5 до 10 м) сначала (с 1995 г.) с орбитальных космических станций «Салют» и «Мир», а затем (после 2001 г.) – с российского сегмента Международной космической станции (МКС) в рамках программы «Ураган».

На низменной казахстанской части северного Каспия море наступало на сушу в полосе шириной 30 км, а по прибрежным поперечным ложбинам еще дальше. Особенно сложная ситуация складывается в результате затопления участков, занятых объектами нефтегазодобывающего комплекса и сельского хозяйства. Так, в прибрежной зоне Казахстана (северо-восток Каспия) районы нефтедобычи и искусственные водно-нефтяные «озера»-отстойники для пластовых вод, содержащих ураганные концентрации тяжелых металлов, и буровых растворов, содержащих нефтепродукты (солярку), поперечником 1–2 км защищались дамбами, которые теперь в большинстве случаев оказываются размытыми наступившим морем. Аналогичные явления постоянно фиксируются с МКС и в прибрежной зоне Дагестана – мелководной полосе шириной 50 км. Здесь обваловочные дамбы сегодня легко прорываются даже обычными штормовыми нагонами. По этой причине содержание тяжелых металлов в морской воде увеличилось в 10 раз, а микробиологическая загрязненность дагестанских морских вод превысила нормы в 200 и более раз.

В Лаганском районе Калмыкии, например, где на территориях, оставленных морем в период падения его уровня, была начата добыча нефти, возникли поселки, санатории, дома отдыха, в результате начавшейся трансгрессии были прорваны защитные сооружения и затоплены несколько кварталов г. Лагань и несколько улиц с. Джалыково. Площадь сенокосов в районе, тянувшихся до подъема у. м. полосой 12–15 км вдоль берега, сократилась до нескольких км. Доля пашенных земель сократилась до 0,5 %, а лесов – до 0,2 %. Сегодня 40 % площади района составляют болота, кустарниковые пустоши, развееваемые пески.

1.5. Актуальные проблемы взаимодействия атмосферы и гидросферы в условиях потепления климата

В большинстве случаев перечисленный ряд событий и явлений укладывается в довольно простые системы причинно-следственных связей, завершающиеся тем или иным глобальным или региональным изменением водных ресурсов. Например: 1) «рост приземной температуры воздуха → увеличение испарения → рост облачности → увеличение количества осадков → повышение водности рек (наводнения)»; 2) «неравномерное потепление над океаном и сушей, а также в высоких и низких широтах → соответствующее сглаживание контрастов температуры между морем и сушей и обострение их между севером и югом → нарушение глобальной системы циркуляции атмосферы → смещение центров действия атмосферы → изменение траекторий движения и водности циклонов → повышение (понижение) водности континентальных регионов → увеличение речного стока → изменение гидрологического режима вод внутренних и вод приустьевых районов окраинных морей»; 3) «потепление климата → таяние ледников → сокращение площади снежного покрова → рост объема вод и повышение уровня океана → рост высоты приливов → нарушение водообмена через проливы → изменение гидрологической структуры вод внутренних и окраинных морей» и т. д.

Тем не менее в каждой из этих схем при ее практической реализации обнаруживается множество региональных тонкостей и деталей, которые во многих случаях исследованы недостаточно. До сих пор, например, среди исследователей нет единой точки зрения на механизм динамики САК, неясен вклад в этот процесс внутриокеанических и атмосферных механизмов, хотя в Северной Атлантике влияние океана на межгодовые изменения атмосферной циркуляции (особенно в зимний период) всеми признается первостепенным. Кроме того, реакция прибрежных морских экосистем на изменение состояния речных бассейнов может проявляться в нескольких формах: 1) изменение площади морей и орографии их берегов в результате затопления и нарушения динамики вод; 2) изменение гидрологического и гидрохимического режима морских вод; 3) изменение гидрологической и гидрохимической структуры морских вод; 4) изменение биологической продуктивности водоема: гидробиологической структуры и режима продукционно-деструкционных процессов; 5) изменение качества морских прибрежных вод.

1.5.1. Речные гидрологические системы

Эти обстоятельства необходимо учитывать при прогнозировании состояния водных ресурсов конкретной территории, а так-

же для успешного решения многих других народно-хозяйственных задач. Так, **для речных гидрологических систем** России и сопредельных государств особо актуальными в этом плане оказываются проблемы:

- оценка структуры водного баланса и приоритетных факторов его формирования в годы различной водности на разных водосборах;
- исследование роли климатических и ландшафтных особенностей территорий водосборов при формировании экстремального речного стока;
- классификация экстремальных гидрологических явлений (расходы и уровни в маловодья и половодья, площади затопления, пересыхание и замерзание рек, заторы и зажоры) на территории России;
- районирование водосборов Русской равнины и Западной Сибири по величине вероятности и повторяемости экстремальных гидрологических явлений;
- оценка объемов ожидаемого речного стока, вероятностей экстремальных гидрологических явлений и изменения их географии в результате возможного дальнейшего потепления климата.

1.5.2. Внутренние и окраинные моря

Для исследователей состояния **водных ресурсов внутренних и окраинных морей** России и сопредельных государств глобальные климатические изменения ставят не менее актуальные проблемы, неразрывно связанные с указанными выше проблемами гидрологии суши:

1) оценка влияния динамики уровня вод Каспийского моря на развитие экстремальных гидроэкологических ситуаций в приустьевых районах Волги, шельфа и прибрежной зоны Северного Каспия;

2) реакция динамической структуры вод Черного моря (интенсивность и положение струи основного черноморского течения, устойчивость и масштабы восточного и западного циклонических круговоротов, вихреобразование в прибрежной зоне) на изменение характера атмосферной циркуляции над водоемом, связанное с глобальным потеплением;

3) изменение интенсивности водообмена Балтики с Северным морем через северные проливы под влиянием активизации циклонической деятельности и подъема уровня океана. Экологические последствия этих процессов (частота возникновения и продолжительность сохранения анаэробных зон, динамика уровня биологической продуктивности водоема);

4) влияние изменений положения центров атмосферного давления Северной Атлантики на характер циркуляции вод Баренцева моря, его тепловой режим, динамику фронтальных зон. Разработка на этом основании оперативного и перспективного прогноза

промысловой обстановки и урожайности поколений основных промысловых объектов;

5) динамика положения Арктического центра высокого давления атмосферы в условиях глобального потепления и ее влияние на ледовый режим полярных морей, а, следовательно, на характер циклонической деятельности над Западно-Сибирским регионом, определяющий состояние его водных ресурсов;

6) связь глобальных изменений атмосферной циркуляции с изменением повторяемости ленинградских наводнений, а также влияние на это явление аномальных синоптических ситуаций в периоды развития Эль-Ниньо;

7) изменение интенсивности водообмена Черного моря через Босфор и Керченский пролив с Мраморным и Азовским морями под влиянием подъема уровня океана и климатических изменений стока рек. Реакция на эти процессы гидрологической структуры его вод – положение характерных гидрологических (основной пикноклин, холодный промежуточный слой, сезонный термоклин) и гидрохимических (граница анаэробной зоны) поверхностей;

8) влияние климатических изменений водного баланса (сток рек, осадки, таяние льдов, обмен через Берингов пролив) на формирование гидрологической структуры морей Арктики (положение и мощность галоклина) – основного фактора, определяющего ледовитость арктического бассейна [Захаров, 1995];

9) влияние климатических изменений речного стока на гидрологию приустьевых областей Дуная, Днепра, Дона, Кубани, Волги (режим солености, фронтальные гидрологические барьеры, стоковые течения, газовый режим и т. д.), а также Азовского моря, шельфов Черного и Каспийского морей, глубоководных участков среднего Каспия и на развитие здесь экстремальных гидроэкологических ситуаций.

1.5.3. Глобальные гидроэкологические задачи

Исследование современных региональных проблем водных ресурсов и решение в этой связи конкретных практических народно-хозяйственных задач не исключает необходимость постановки для будущего решения и **глобальных гидроэкологических задач**, связанных с изменениями климата:

I. Исследовать механизмы и характер динамики основных центров действия атмосферы – Азорского, Арктического и Гонолульского максимумов, Исландской и Алеутской депрессий, а также изменчивости величин известных индексов Южного, Северо-Атлантического и Тихоокеанского колебаний под влиянием глобального потепления. Оценить их роль в формировании и динамике континентальных водных ресурсов.

II. Установить влияние климатических изменений глобальной атмосферной циркуляции на положение и мощность основных океанических апвеллингов: Перуанский, Калифорнийский в Ти-

хом; Канарский, Бенгельский (Намибийский) в Атлантике; Сомалийский в Индийском океане; планетарных фронтальных зон – Экваториального, Субэкваториального, Тропического, Субполярного и Полярного фронтов; струйных течений (Гольфстрим, Куроисио). Оценить изменение их термодинамических показателей и, соответственно, вклада в динамику водных ресурсов планеты.

III. Оценить роль Эль-Ниньо в процессе формирования водных ресурсов континентов, развития гидроэкологических ситуаций в различных регионах планеты. Исследовать вклад океанического механизма Эль-Ниньо – откат в период ослабления пассатных ветров вдоль экватора к побережью Перу и Эквадора теплой воды от западного побережья Тихого океана (Австралия), размыв Экваториального фронта, остановка Перуанского течения и апвеллинга, в тепловой баланс планеты, структуру глобальной циркуляции атмосферы и трансформацию водных ресурсов.

Вопросы

1. Основные положения концепции морских географо-экологических исследований.
2. Климатообразующие факторы Земли. Механизмы и временные масштабы их действия.
3. Основные механизмы современных изменений климата.
4. Признаки глобального потепления и его региональные особенности.
5. Атмосферные последствия глобального потепления.
6. Гидрологические последствия глобального потепления.
7. Причинно-следственные связи в системе «атмосфера – гидросфера».
8. Формы реакции морских экосистем на трансформацию водных ресурсов водосборных бассейнов.
9. Механизм современной динамики уровня Каспийского моря.
10. Реакция экосистемы Каспийского моря, изменение водности р. Волга.
11. Актуальные проблемы взаимодействия атмосферы и гидросферы для речных гидрологических систем.
12. Актуальные проблемы взаимодействия атмосферы и гидросферы для внутренних и окраинных морей России.
13. Актуальные проблемы взаимодействия атмосферы и гидросферы для решения глобальных гидроэкологических задач.

Глава 2. АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ: ФОРМЫ, КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ, ГЕОГРАФИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ, СТРАТЕГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время на фоне климатических изменений, происходящих в атмосфере и гидросфере нашей планеты, в ее морских и речных экосистемах активно развиваются процессы, вызванные хозяйственной деятельностью как на территориях морских водосборов, так и непосредственно на морских и речных акваториях.

2.1. Использование природных вод человеком

Водные ресурсы планеты используются человеком двумя основными способами: с **изъятием** и **без изъятия** воды из ее источника. *Первый способ* применяется при: 1) коммунально-бытовом водоснабжении; 2) водоснабжении промышленности и сельского хозяйства; 3) ведении рыбного прудового хозяйства.

Второй способ включает: 1) гидроэнергетику; 2) водный транспорт; 3) рыбное хозяйство; 4) лесосплав; 5) рекреацию; 6) санитарное благоустройство и природоохрану; 7) попуски воды по международным соглашениям.

Первый водопровод, построенный в Риме в 313 г. до н. э., подавал ежедневно на каждого жителя города по 88 ведер (700 литров) воды. В конце XIX века идеальным суточным расходом воды считали 12,5, а средним – 5,5–6,8 ведра воды на человека в сутки (40–50 литров).

Наибольшее количество воды теряется безвозвратно при орошаемом земледелии. В зависимости от вида выращиваемой культуры и климатических условий региона этот показатель может изменяться от 500 до 15 000 м³ воды на один гектар (рис. 2.1).

В целом по планете потери воды на орошение составляют 85 % всего безвозвратного водопотребления. На трассе Каракумского канала, например, за счет испарения и фильтрации в необлицованном русле канала терялось до 25 % воды, забираемой из реки Амударья.

В настоящее время 62 страны мира на 50 % покрывают свои потребности в электроэнергии за счет гидроэнергетики. В таких странах, как Бурунди, Конго, Намибия, Норвегия, Парагвай, этот показатель составляет 99 %. В Бразилии он достигает 94 %, в Австрии – 70, Канаде и Швейцарии – 60, а в России и США – соответственно 35 и 8 %.

При строительстве ГЭС на равнинных реках для аккумуляции в водохранилище 1 м³ воды надо затопить около 300 м² территории плодородной поймы. При этом после строительства водохранилища в результате подъема уровня грунтовых вод происходит подтопление окружающих земель на территории в пределах 3–15 % от площади водохранилища.

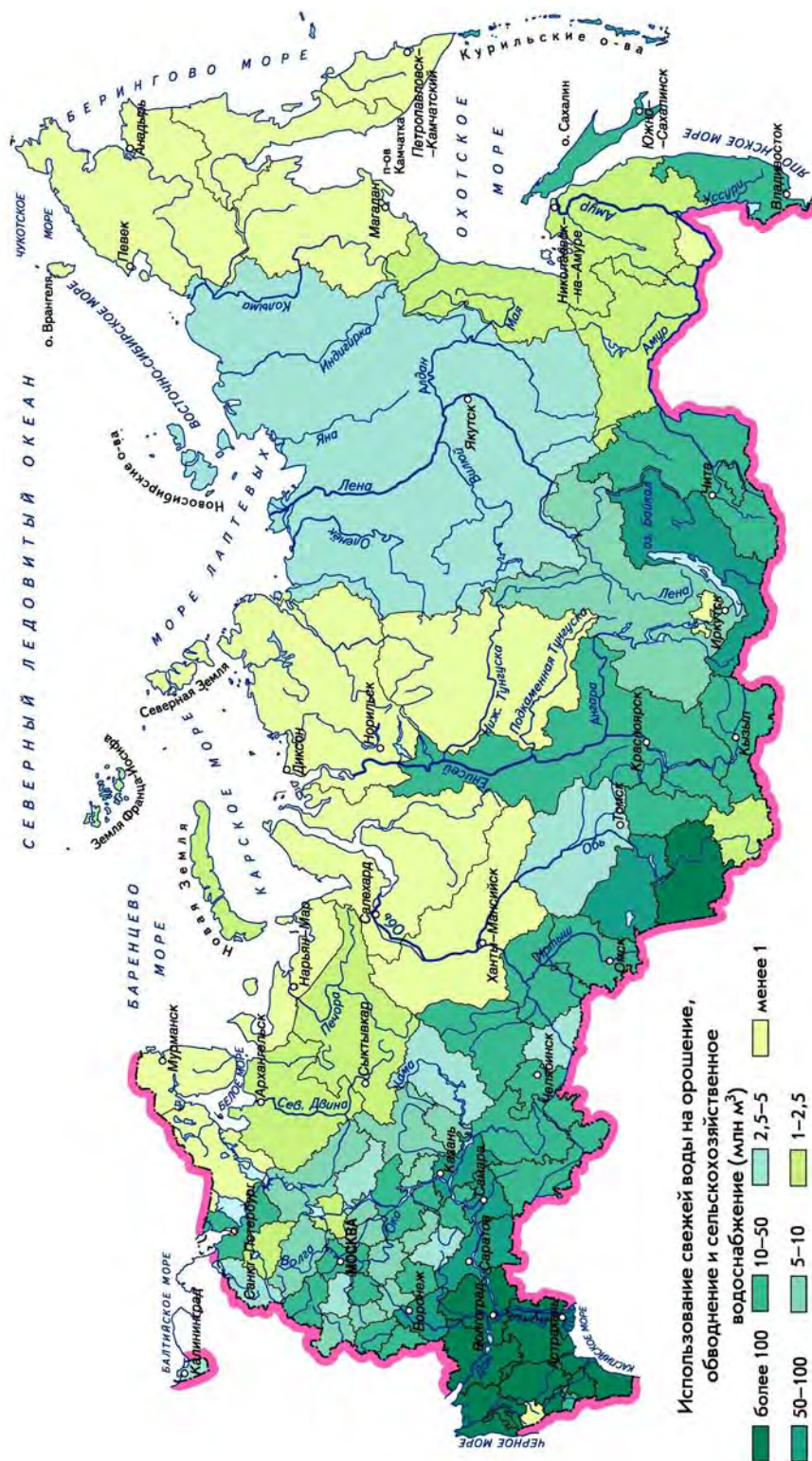


Рис. 2.1. Использование воды в сельском хозяйстве на территории Российской Федерации [Национальный атлас..., 2008].

С 1900 по 2000 г. объем водозабора на все хозяйственные нужды человека увеличился в девять, а безвозвратное водопотребление – в восемь раз (табл. 2.1). По прогнозу при условии сохранения современных тенденций водопотребления к 2025 г. первый показатель может увеличиться еще в 1,5 раза, а второй практически стабилизируется.

Таблица 2.1.

**Динамика мирового водопользования, км³/год
[Колобаев, 2005]**

ПОКАЗАТЕЛЬ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ	1990-й	2000-й	ПРОГНОЗ
			2025-й
Забор воды из природных источников	400	3790	5235
Безвозвратное потребление и потери воды	270	2280	2764

В 2000 г. доля воды, используемой населением, промышленностью и сельским хозяйством всего мира, составляла соответственно 9, 33 и 58 % общего объема водных ресурсов, участвующих в жизнедеятельности человека. При этом максимум (55 %) мирового безвозвратного водопотребления отмечался в сельском хозяйстве, 31 % его приходился на промышленность, 8 % тратило население и 6 % испарялось с поверхности водохранилищ.

Больше всего воды (140 км³/год) использует население Азии (табл. 2.2). По затратам воды в промышленности первенство принадлежит Северной Америке (460 км³/год), а в сельском хозяйстве – опять странам Азии (1780 км³/год). Промышленность США использует воды почти в 10, а сельское хозяйство – почти в 20 раз больше, чем российская (380 и 48 км³/год; 220 и 13 км³/год соответственно; рис. 2.2).

Таблица 2.2.

Региональное водопользование в 2000 г. [Колобаев, 2005]

РЕГИОН, ГОСУДАРСТВО	Водозабор из природных источников, км³/год			
	Население	Промышленность	Сельское х-во	СУММА
Азия	140	180	1780	2100
Европа	50	360	150	560
Сев. Америка	60	460	240	760
Африка, Ю. Америка и Австралия	70	100	200	370
Все страны мира	320	1100	2370	3790
США	50	380	220	650
Германия	6	27	3	36
Россия	17	48	13	78
Украина	3,2	9,2	7,5	20
Беларусь	0,9	0,6	0,4	1,9

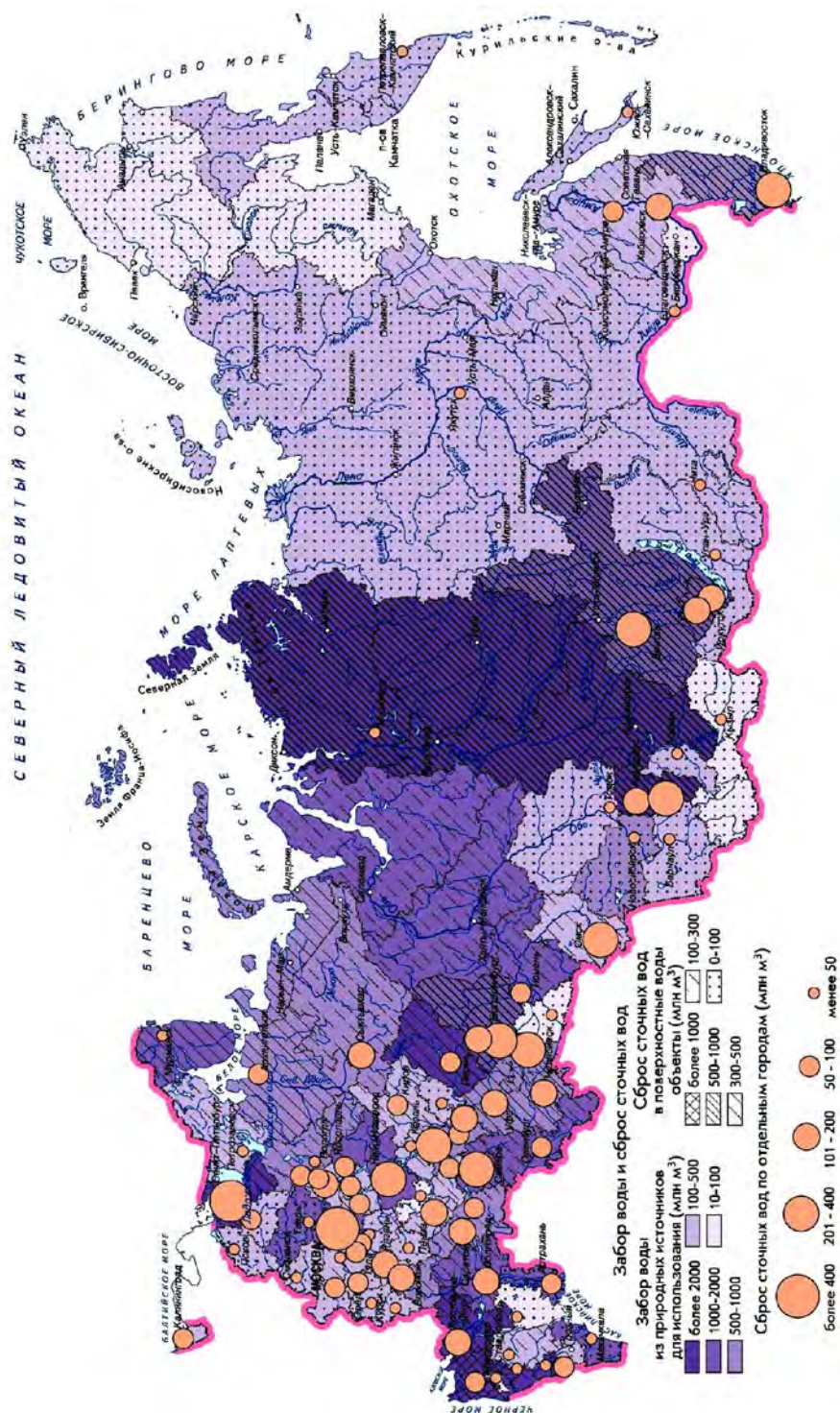


Рис. 2.2. Водозабор и сброс сточных вод отдельными городами на территории Российской Федерации [Национальный атлас..., 2008].

2.2. Гидротехническое строительство, зарегулирование и внутригодовое перераспределение речного стока

Первые маленькие «мельничные плотины» и водохранилища появились в Европе в III–IV веках, но по мере развития горнорудного дела, металлургии, лесозаготовок их размеры стали увеличиваться, и в XIV–XV веках в Испании, например, уже были водохранилища (Алманас и Рельс) объемом в миллионы м³. В этот же период (1367–1696 гг.) началось активное гидротехническое строительство в странах бывшего социалистического лагеря, многие из его объектов эксплуатируются и сегодня.

В 1699 г. вышел первый указ Петра I **«на реках Тагиле и Нейве завести железные заводы где все мануфактуры (ручные производства) будут водою действовать»**. Уже в 1701 г. на р. Нейве была построена первая уральская гидроустановка при казенном Федьковском «железодельном» заводе. За первую половину XVIII века на Урале был построен 21 такой завод с гидроустановками. К середине века братья Демидовы получили дворянское звание за строительство около 30 заводов, а дворяне-помещики Строгановы за аналогичный подвиг были возведены в графское звание. К 1740-м гг. Россия по выплавке чугуна приблизилась к лидеру – Швеции, обогнав Германию и Англию. Только в XVIII веке в России было построено более 200 больших плотин, а в 1736–1738 гг. – первое Заводское водохранилище. После изобретения в 1770-х гг. И. И. Ползуновым паровой машины гидростроительство на Урале было прекращено.

Требования развивающейся промышленности, развитие водного транспорта (строительство и регулирование судоходства на реках и каналах), а также коммунального хозяйства в XVIII–XIX веках определили необходимость дальнейшего строительства водохранилищ и других гидротехнических сооружений. В начале XIX века в России была создана система межбассейновых судоходных соединений, среди которых **Мариинский (Волго-Балтийский) водный путь** длиной **1100 км**. По нему из Волги – через р. Шексну, Белое озеро, рр. Ковжа, Вытегра, Онежское озеро, р. Свирь, Ладожское озеро и р. Неву – можно было попасть в Балтийское море. При этом в верхнем течении Волги построили крупнейшее (400 млн. м³) в то время водохранилище **Волжский бейшлот**, поддерживающее и сегодня круглый год судоходство на участке Волги до Твери.

На рубеже XIX–XX веков начался новый этап гидростроительства, связанный с развитием мировой электроэнергетики. Сооружение гидроэлектростанций началось после изобретения во второй половине XX века гидравлических турбин с высоким КПД. Первая в мире Охтинская ГЭС (260 кВт) построена в 1895 г. С изобретением поворотно-лопастной турбины в 1920 г., позволившей использовать напор воды в 15–60 м, стали строить мощные ГЭС и на

равнинных реках. В разгар гражданской войны (1918 г.) в России началось строительство Волховской ГЭС.



Фото 2.1. Днепровская ГЭС в 1933 г. стала первенцем советской гидроэнергетики.

В 1920 г. был принят план электрификации России, по которому в течение 15 лет в стране планировалось ввести 1750 тыс. кВт новых мощностей, из которых 515 – на гидроэлектростанциях. В 1933 г. была построена ДнепроГЭС и заполнено Днепровское водохранилище – 3,3 млн. м³ (фото 2.1).

В этом же 1933 г. вошел в строй **Беломоро-Балтийский** канал длиной 227 км, соединивший Белое море с Каспийским и сокративший путь между Балтийским и Белым морями на 4000 (!) км. В 1932–1937 гг. был построен канал им. Москвы (127 км), связавший р. Москва с р. Волга и превративший г. Москву в **порт пяти морей**. В его систему вошел ряд водохранилищ, из которых Иваньковское, заполненное в 1937 г., стало основным источником водоснабжения столицы. В 1939–1943 гг. заполнилось Угличское, а в 1941–1947 гг. – Рыбинское водохранилища на Волге.

После Великой Отечественной войны в 1948 г. восстановили разрушенный Невинномысский канал, используемый и сегодня для переброски вод р. Кубань в засушливые районы Ставрополя и Краснодарского края. В 1952 г. завершилось строительство **Волго-Донского канала**, связавшего эти реки ниже г. Калач на Дону и у г. Красноармейск (под Волгоградом). На протяжении 101 км канал имел 13 шлюзов и 3 плотины, из которых главная – Цимлянский гидроузел с одноименным водохранилищем.

В 1950–1970 гг. заполнились водохранилища **днепровского каскада**: Каховское (1955–1958), Кременчугское (1959–1961), Киевское (1964–1966), Днепродзержинское (1965–1966), Каневское (1972–1978). На этот же период приходится заполнение водохранилищ **волжского каскада**: Куйбышевского (1955–1957), Горьковского (1955–1957), Волгоградского (1958–1961), Саратовского (1967–1968) (фото 2.2).



Фото 2.2. В середине 1950-х гг. вступила в строй Каховская ГЭС – первая послевоенная электростанция днепровского каскада.

Сегодня из **2375 крупных** (>100 млн. м³) водохранилищ мира больше всего (883, или 37 %) расположено в Северной Америке, по 20–25 % в Европе и Азии и по 9,4 и 3 % – в Центральной и Южной Америке, Африке и Австралии с Океанией (табл. 2.3). Больше всего водохранилищ (4132) расположено в США, далее следуют Россия (2552), Япония (1938), Индия (1100) и другие страны мира, где число искусственных озер менее 1000. При этом Россия лидирует в мире по суммарному объему водохранилищ (1195 км³; рис. 2.3). Второе место по суммарному объему водохранилищ занимают США (829 км³), третье – Канада (748 км³).

Таблица 2.3.

**Показатели крупных (>100 млн. м³) водохранилищ мира
[Водохранилища, 2001]**

ПОКАЗА- ТЕЛЬ	Европа	Азия	Африка	Сев. Аме- рика	Центр. и Южная Америка	Австралия Океания	Сумма
Количество	517	577	105	883	202	73	2357
Полный объем (км ³)	616	1628	885	1678	641	77	5552
Площадь (тыс. км ²)	80	120	110	220	60	4	594

СТРАНА	Все водохранилища		Крупные водохранилища (>100 млн. м³)			
	количество	объем (км³)	количество	объем (км³)	% от общего	
					кол-ва	объема
Канада	500	748	133	730	26	97,6
Китай	500	203	142	194	28	95,6
Бразилия	379	252	84	236	22	93,6
ЮАР	289	25	29	23	10	92

В 1990 г. в мире строилось 48 плотин высотой более 150 м. Из них 17 – в странах Латинской Америки, 8 – в странах Восточной и Южной Азии, 7 – в Китае, по 4 – в Индии, Европе и Азии, 2 – на территории бывшего СССР и по 1 – в Канаде и Турции (фото 2.3). На территории бывшего СССР за последние 50 лет XX века всего построено 400 !) плотин высотой более 15 м. Среди них 6 из 26 самых высоких в мире, имеющие высоту 200 м и более: Нурекская (300 м) – р. Вахи, Таджикистан (1972–1974); Ингульская (275 м) – р. Ингури, Грузия (1978–1980); Чиркейская (235 м) – р. Сулак, Дагестан (1974–1976); Саяно-Шушенская (220 м) – р. Енисей, Красноярский край (1978–1980); Токтогульская (210 м) – р. Нарын, Киргизия (1973–1975); Худонская (210 м) – р. Ингури, Грузия (1978–1990).



Фото 2.3. В конце XX века в мире было построено 26 плотин высотой более 200 м [Worldprints.com].

2.3. Последствия зарегулирования стока рек

В первые годы активного зарегулирования речного стока (начало 50-х гг.) при строительстве ГЭС на равнинных реках основным его последствием для окружающей среды считалось влияние подпора рек на сам водоток и прилегающие территории. Действительно оказалось, что для аккумуляции в водохранилище 1 м^3 воды надо затопить около 300 м^2 территории плодородной поймы. В этой связи за последние 30 лет XX века из зон воздействия построенных в мире 30 тыс. водохранилищ объемом в



Фото 2.4. Колокольня Никольского собора Калязинско-Троицкого монастыря (а) с 1930-х годов стала островом (б) Угличского водохранилища (фото А. Щербакова).

6 тыс. км^3 и площадью зеркала в 400 тыс. км^2 было переселено более 10 млн. человек. При этом на территории бывшего СССР, например, при заполнении Рыбинского и Ивановского водохранилищ полностью ушли под воду города Молога и Корчев, а в результате создания Угличского водохранилища был частично затоплен древнерусский город Калязин, основанный в XII веке. При этом был взорван и залит водами искусственного моря Никольский собор Калязинско-Троицкого монастыря (фото 2.4).

В конце 1950-х – начале 1960-х гг. практика эксплуатации водохранилищ показала, что после их строительства в результате подъема уровня грунтовых вод происходит подтопление окружающих земель на территориях, занимающих 3–15 % площади самого водохранилища. Такие грандиозные события не могли не от-

разиться на естественном водном балансе отдельных районов планеты. Во многих засушливых зонах планеты водохранилища стали мощным региональным климатообразующим фактором. В результате на 700–800 тыс. км² зоны подтопления произошло переформирование берегов, изменился почвенный и растительный покров, а на 1,5 млн. км² была нарушена инфраструктура – система землепользования, населенные пункты, дороги, промышленные предприятия, линии связи и электропередачи.

В странах Латинской Америки, Африки, Азии за последние 50 лет XX века объем водохранилищ увеличился в 35, 60 и 75 раз соответственно. Одно только Братское водохранилище (169 млрд. м³), например, более чем в 11 раз (!) превосходит объем всех водохранилищ, существовавших на планете в конце XIX – начале XX века, а площадь одного из крупнейших водохранилищ мира – Вольта (8480 км²) в Африке занимает 4 % территории Ганы (фото 2.5).

Фото 2.5. *Длина береговой линии заполненного в 1964–1967 гг. самого крупного в мире по площади водохранилища Вольта (Гана) превышает 7 тыс. км.*

Несмотря на то, что благодаря строительству водохранилищ сток рек в маловодные периоды года возрос – речные водные ресурсы стали более доступны для использования, тем не менее к началу 1970-х гг. выяснилось, что при этом водообмен в реках, озерах, речных бассейнах существенно замедлился. К 1960 г. время пребыва-

ния воды в реках с водохранилищами возросло с 20 до 40 суток, к 1970-му – оно увеличилось в 3,3, а к 1980-му – в 4,9 раза. Для рек СССР продолжительность пребывания воды в руслах рек увеличилась с 22 до 89 суток, а в бассейне Волги после строительства каскада водохранилищ водообмен замедлился почти в 10 раз. В странах Азии такое увеличение составило 14 раз (с 13 до 185 суток), в Европе – 6,7 (с 10 до 67 суток), в Африке – 6,4 раза (с 18 до 115 суток).

Кроме того, зарегулирование стока, например, Днепра, каскадом водохранилищ, полезная емкость которых составляет 20 км³, определило тот факт, что в маловодные годы Киевское, Кременчугское, Днепродзержинское, Днепровское и Каховское «моря» могут вместить весь объем его весеннего половодья, а в другие годы – около половины этой величины. Таким образом, в настоящее время режим поступления в море вод Днепра в значительной степени определяется не естественными процессами, а режимом сброса вод через плотины. Кроме того, сбрасываемая речная вода оказывается совершенно другого качества. В процессе аккумуляции в водохранилищах происходит существенное изменение ее свойств (переход минеральных форм соединений в органические, выпадение в осадок крупнодисперсных фракций твердого стока, растворение взвешенных форм веществ и т. д.).

2.4. Последствия безвозвратного водопотребления

Гидротехническое строительство привело к росту безвозвратного водопотребления на нужды народного хозяйства, а также потерь воды на дополнительное испарение с поверхности водохранилищ и на фильтрацию в грунт (см. рис. 2.2). В результате к 1982 г. величина пресного стока снизилась, например, в Каспийское (35–40 км³), Черное (25–30 км³), Азовское (13 км³) и Аральское (75–80 км³) моря на 15, 10–15, белее чем на 30 и на 70 % соответственно. При этом суммарные безвозвратные потери воды на испарение с поверхности водохранилищ в 1975 г. составили 110, а к 2000 г. увеличились до 240 км³.

С начала 60-х гг. площадь орошаемых земель в республиках Средней Азии, например, возросла в 1,5–2,4 раза. С 1959 по 1987 г. их население увеличилось в 2–3,2 раза. В результате водопотребление в регионе увеличилось в семь-девять раз. После такого скачка расхода воды в бассейнах рек Сырдарьи и Амударьи, из 56 км³ речного стока, поступавшего в море до 1960 г., в середине 1970-х гг. Арал стал получать всего 7–11 км³, а в 80-х гг. в течение ряда лет речные воды до моря вообще не доходили. Вода уходила на орошение новых территорий для выращивания хлопка и пастбищ для разведения овец каракулевых пород; коммунальные нужды (до 50–100 л/сутки на человека); строительство пяти гидроэлектростанций с крупными водохранилищами, оросительных каналов и плотин для обеспечения подачи в них воды.

2.4.1. Гибель Аральского моря

В течение 50 лет после начала регулярных наблюдений за уровнем Аральского моря (с 1911 по 1960 г.) амплитуда его колебаний около отметки 53 м не превышала 1 м – режим моря был стабильным. Сегодня (2007 г.), благодаря контролю из космоса, установлено, что в результате гидротехнических мероприятий в бассейне Аральского моря с 1960 по 1976 г. его уровень понизился на 6 м (до отметки 48 м). К 1984 г. он упал еще на 5 м (до отметки 43 м). Отметку уровня 33 м Аральское море достигло к 2000 г., а в 2003-м уровень Большого Арала (южного остатка моря) составил 29,85 м. При этом скорость его высыхания возрастала с 20 см/год (1961–1970 гг.) до 57 (1971–1980 гг.) и 73 см/год (1981–1999 гг.), превышая иногда 1 м/год. Только за 1975–1989 гг. море отступило от г. Аральск (юг) на 30, а на восточном берегу – на 15–40 км (!). В 1988–1989 гг. северная и южная части водоема полностью разделились соответственно на Малый и Большой Арал (рис. 2.4).

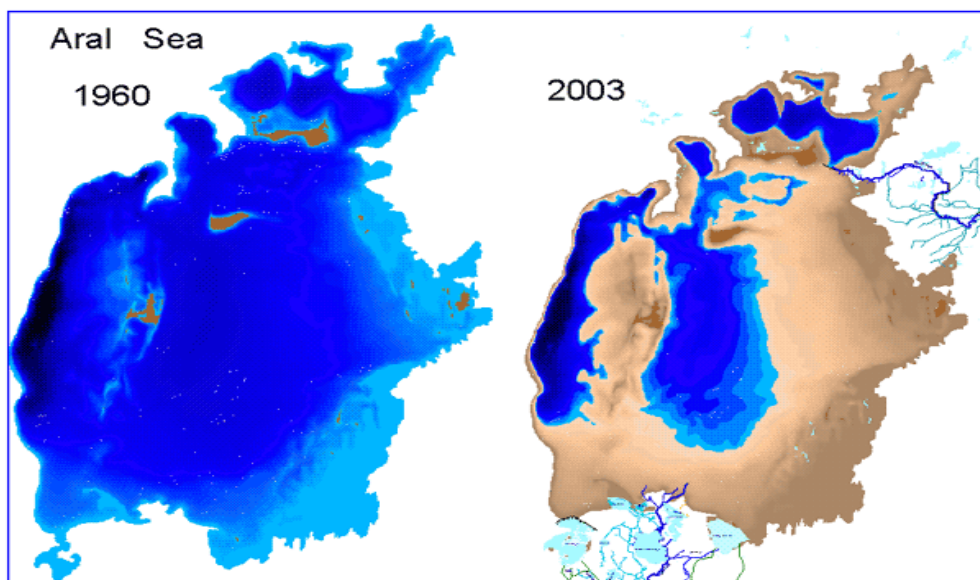


Рис. 2.4. С 1960 по 2007 г. уровень Аральского моря снизился почти на 24 м.

К 2003 г. площадь моря сократилась в четыре раза (15 тыс. км²), а объем вод уменьшился в 10 раз (100 км³). При этом соленость в придонном слое Большого Арала стала более 90 ‰. В сентябре 2006 г. она достигла 109 ‰ (!). Кроме того, в Большом Арале, максимальная глубина которого превышает 40 м, сегодня, начиная с горизонта 19–22 м и до дна, воды периодически насыщаются сероводородом.

Экологические изменения в бассейне Аральского моря. Усыхание Арала существенно изменило климат Приаралья. Уже к 1980 г.

смягчающего влияния моря не стало. Из морского климат здесь превратился в континентальный. Число засушливых дней в году возросло с 30–50 до 120–150, весенние заморозки стали сохраняться на 10–12 дней дольше, а осенние, наоборот, наступают на две недели раньше. Максимум осадков с февраля-марта сместился на апрель-июнь. Количество дней с пыльными бурями увеличилось почти в четыре раза (фото 2.6), а из-за вовлечения в них солей со дна высохшего моря (фото 2.7) минерализация атмосферных осад-



Фото 2.6. Солевые бури над Аралом хорошо видны из космоса.



Фото 2.7. На месте отступившего Аральского моря остались безжизненные солончаки.

ков возросла в шесть-семь раз. Многие животные не смогли или не успели приспособиться к такому стремительному изменению условий. Из 70 видов млекопитающих Приаралья осталось 30, а из 319 видов птиц выжило 168. При этом число гнездящихся птиц сократилось со 173 до 30 видов.

На орошаемых землях Средней Азии используется в 10–15 раз больше удобрений, чем на других территориях. В результате в реках и каналах, например, Узбекистана, содержание хрома, меди, фенолов, сульфатов в десятки раз превышает предельно допустимые величины. Пить такую воду опасно для жизни. Заболеваемость людей паратифом в Каракалпакии, например, в 23 раза выше, чем в среднем по стране, а общая смертность населения здесь за 10 лет увеличилась в 15 (!) раз. При этом заболеваемость желчно-каменной болезнью увеличилась в 5, а раком пищевода – в 10 раз. В низовьях Сырдарьи заболеваемость тифом за пять лет возросла в 20 (!) раз.

Только в апреле 1987 г. в стране была создана правительственная комиссия по экологической ситуации в бассейне Аральского моря. На основании результатов ее работы в сентябре 1988 г. ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли постановление с не менее витиеватым названием ***«О мерах по коренному улучшению экологической и санитарной обстановки в районе Аральского моря, повышению эффективности использования и усилению охраны водных и земельных ресурсов в его бассейне»***.

Далее в 1989 г. был создан научно-исследовательский и координационный центр «Арал» для разработки и осуществления программ изучения моря, финансирования проектов и подготовки рекомендаций Верховному Совету СССР и правительству страны. В это же время в рамках Международного географического союза был разработан проект «Критические зоны мира», в который вошел Аральский регион. Но после известных политических и экономических событий 1993 г. бывшая «жемчужина Средней Азии», а ныне «физико-географический объект», оказалась в юрисдикции молодых независимых государств – Киргизии, Таджикистана, Узбекистана, Туркменистана и Казахстана. Решать проблему Арала им, скорее всего, придется самостоятельно.

2.5. Количественные критерии антропогенной нагрузки на водные ресурсы

Единой классификации видов антропогенной нагрузки на водные ресурсы водосборов пока не существует. Тем не менее сегодня выделяются 16 наиболее эффективных в этом плане приоритетных видов хозяйственной деятельности человека. 13 форм возможных ее последствий для водных объектов определены как неблагоприятные. Среди них, например, по требованию системы Международного глобального мониторинга только группа наибо-

лее репрезентативных для сброса в водоемы химических веществ включает около 60 наименований.

Не менее интересны в плане количественных оценок уровня антропогенной нагрузки на водные ресурсы водосборов оказываются и такие показатели, как:

1. Отношение водозабора за определенный период времени к величине источника водоснабжения – полного речного стока, подземной его составляющей или зарегулированного стока. Он *отражает долю использованных ресурсов стока.*

2. Отношение безвозвратного водопотребления к величине речного стока, представляющее *количественную меру истощения водных ресурсов.*

3. Соотношение объема сточных вод к расходу воды в реке, отражающее *качественное истощение водных ресурсов (кратность разбавления).*

4. Соотношение объемов сброса ЗВ с твердым стоком и естественным химическим стоком или с рассчитанным предельно допустимым сбросом.

5. Отношение полезного и полного объема водохранилища к величине полного речного стока за год или сезон.

Среди косвенных показателей антропогенной нагрузки на водные ресурсы выделяют: *грузооборот на воде; площадь распахан- ных земель; характер их обработки; урожайность; плотность автодорожной сети; количество выбросов ЗВ в атмосферу пред- приятиями; численность городского и сельского населения; ва- ловый национальный доход; производство электроэнергии, про- мышленной и сельскохозяйственной продукции.*

Для оценок уровня антропогенной нагрузки на водные ресурсы в последние годы в Институте географии РАН предложено также использовать отношение плотности населения к объему речного стока. Расчеты этого критерия на территориях разных континен- тов, а также на всей территории России и отдельных водосборов морей, ее омывающих, позволили оценить пространственную из- менчивость антропогенных нагрузок на водные ресурсы в рамках исследованных районов, составить представление о состоянии качества поверхностных вод здесь по косвенным данным.

2.5.1. Водосборы стран мира

Перечисленные прямые и косвенные критерии антропогенной нагрузки на водные ресурсы дают возможность сравнить их состо- яние в различных регионах планеты, выделить самые неблагопо- лучные в этом плане континенты, страны, конкретные водосборы.

1. Сегодня на 1 км³ речного стока в среднем в мире приходится 130 тыс. человек – в два раза больше, чем в 1950 г. Максимальная нагрузка населения на водные ресурсы (240 тыс. чел./км³) на- блюдается в Европе (рис. 2.5). Затем следуют Азия (220), Африка (150), Северная Америка (70), Южная Америка (30) и Австралия с Океанией (20 тыс. чел./ км³). Среди стран мира по этому пока-

зателю первенство занимают Германия (760), Индия (530), Китай (400), Франция (330 тыс. чел./ км³). В аутсайдерах оказываются Канада (10), Бразилия (30) и Россия (40 тыс. чел./км³) (рис. 2.6).

II. Годовое истощение водных ресурсов в среднем по миру составляет 5 %. Его максимумы в Европе отмечаются в Болгарии и Румынии (31 %), а также в Нидерландах (39 %). В Азии эта величина в два раза выше среднемирового уровня и достигает максимума в бассейне Сырдарьи и Амударьи. В странах Аравийского полуострова (Ирак, Израиль, Кувейт, Йемен, Объединенные Арабские Эмираты), в отдельных районах Индии и Китая безвозвратное водопотребление также близко к 100 %.

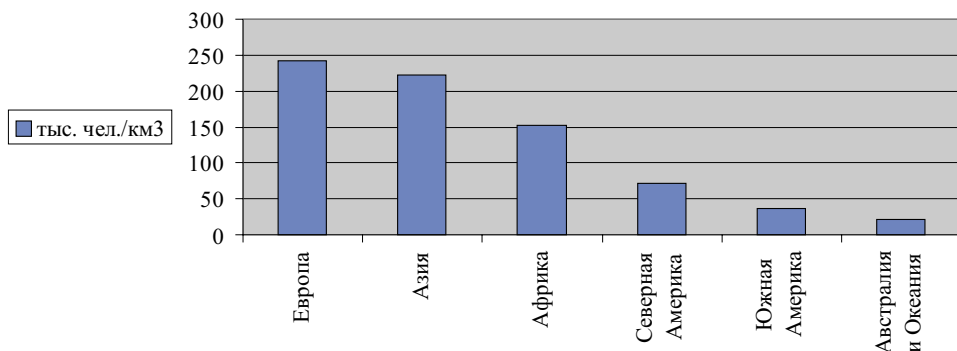


Рис. 2.5. Нагрузка населения на водные ресурсы континентов мира.

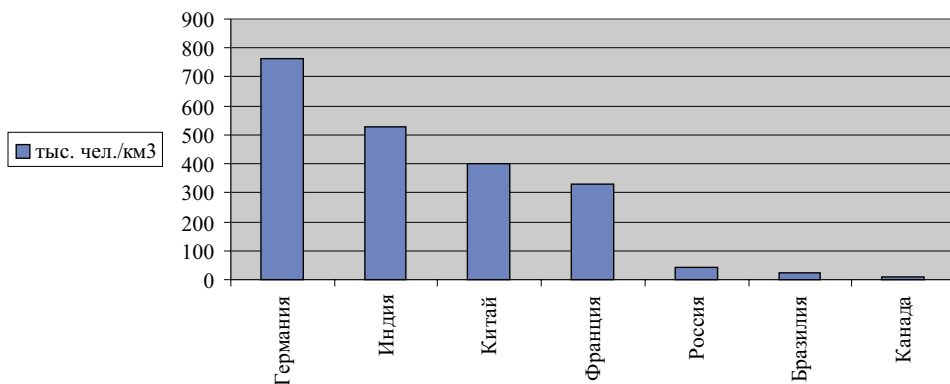


Рис. 2.6. Нагрузка населения на водные ресурсы отдельных стран мира.

В Северной и Центральной Америке истощение водных ресурсов ниже среднемирового. Его максимумы отмечены на юго-западе США и северо-западе Мексики (до 100 % при среднем по этим странам – 6 и 15 %). В Южной Америке этот показатель очень незначителен.

В Африке при средней величине истощения ресурсов 4 % максимумы (до 25 %) отмечены в Египте, Судане, Ливии, Тунисе и

Марокко, а на юге Африки безвозвратно забирают на нужды хозяйства менее 20 % речного стока. Для Австралии и Океании истощение водных ресурсов в среднем не превышает 1 %, хотя на юго-восточном побережье страны из-за интенсивного орошения земель оно возрастает до 15–30 %.

III. Среднее (без учета эффективности очистки) разбавление сточных вод для всего мира составляет 27 раз. Самым неблагоприятным по этому показателю континентом оказывается Европа. Здесь происходит всего восьмикратное разбавление сточных вод естественным стоком, что определяет в итоге высокий уровень их загрязнения. Вода реки Висла (бассейн Балтики) – самой загрязненной реки Восточной Европы, непригодна даже для промышленного использования. Ситуация с загрязнением Рейна и Дуная (бассейн Черного моря) в последние годы XX века несколько улучшилась, но также остается очень острой.

Максимальное разбавление (170 раз) сточных вод происходит в Южной Америке, обладающей 25 % мировых запасов речного стока и отличающейся весьма незначительной нагрузкой на него населения. Тем не менее побережья некоторых рек бассейна Атлантического океана в Колумбии (Магдалена, Каука) и Аргентине (бассейн Ла-Плата), а также рек бассейна Тихого океана в Перу (Монтаро) из-за почти полного отсутствия очистных сооружений в городах имеют очень низкое качество воды по биологическим показателям. Также высока кратность разбавления (170 раз) сточных вод в Австралии и Океании, что обеспечивает их высокое качество.

Сточные воды Африки разбавляются реками в среднем по континенту в 84 раза. Тем не менее почти полное отсутствие очистных сооружений и недостаток водных ресурсов в странах Северной Африки оказываются причинами локальных ухудшений качества вод в районах речных портов Египта, Туниса, Ливии, Судана, Марокко.

В Азии сточные воды разбавляются в среднем в 24 раза – значительно ниже среднемирового уровня. Это определяет высокое загрязнение рек юго-запада материка и Индии (бассейн Индийского океана), а также рек Китая (бассейн Тихого океана).

Разбавление сточных вод реками Северной Америки (15 раз) в два раза ниже среднемирового. В США этот показатель в среднем по стране (семь раз) оказывается еще ниже. В этой связи, несмотря на высокую степень очистки, воды рек континента в большинстве случаев относятся к категории сильнозагрязненных. Аналогичным образом характеризуются и речные воды Мексики, где разбавление ниже среднемирового в три раза.

2.5.2. Водосборы территории России

По территории России протекает свыше 2,5 миллиона рек. Подавляющее большинство из них (94,9 %) имеют длину 25 км и менее. Число средних рек, длиной от 101 до 500 км, составляет 2833 (0,1 %), число больших – 214 (0,008 %).

Реки России принадлежат к бассейнам трех океанов: Северного Ледовитого, Тихого и Атлантического (рис. 2.7). Кроме того, часть

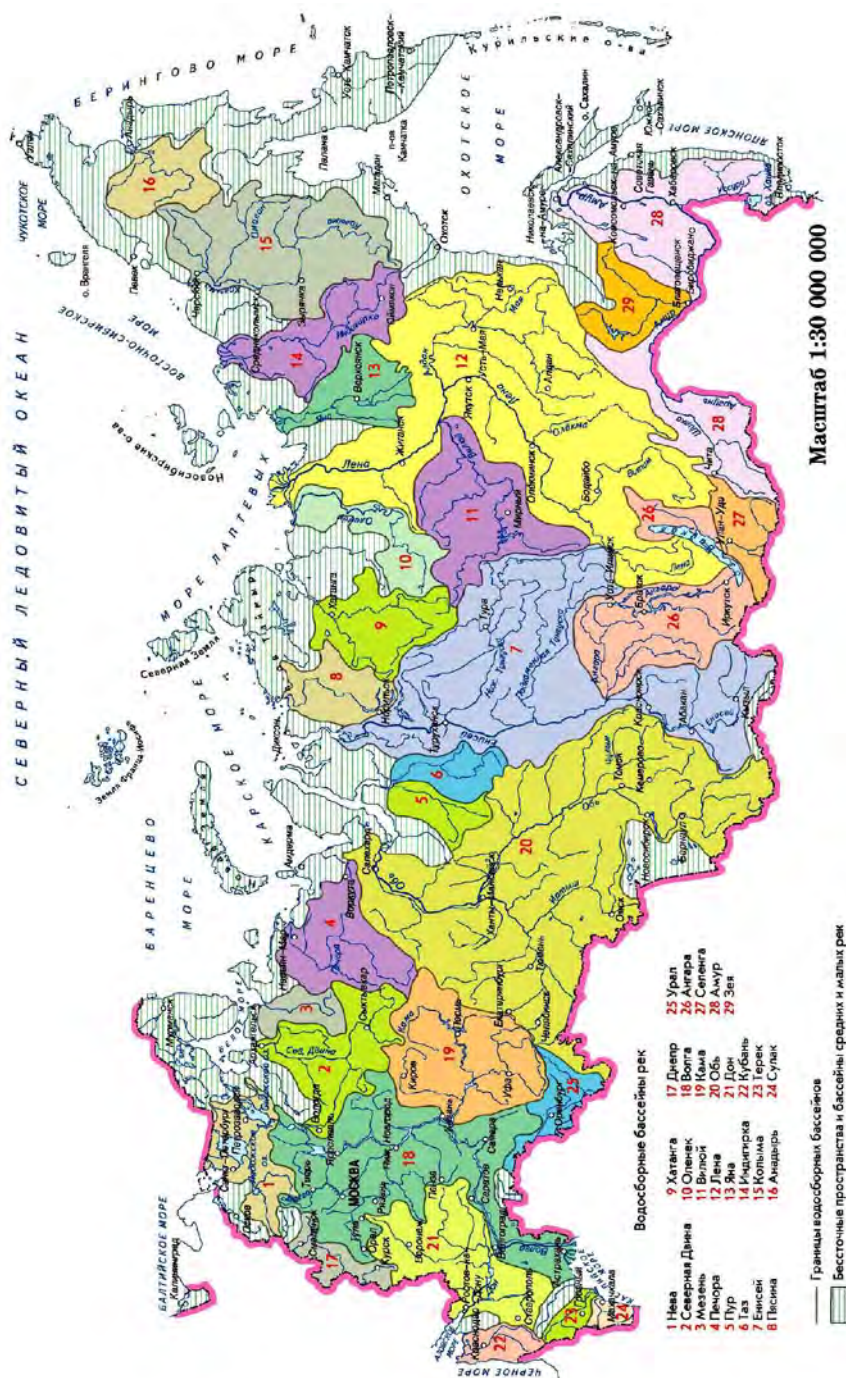


Рис. 2.7. Водосборные бассейны рек Российской Федерации
 [Национальный атлас..., 2008].

рек впадает во внутренние, не связанные с Мировым океаном моря и озера. Большинство рек несут свои воды в Северный Ледовитый (64 %) и Тихий океаны (27 %). В Азово-Черноморском (1 %) и Каспийском бассейнах (7 %) насчитывается всего 193942 реки.

Пять крупнейших рек России имеют водосборную площадь, превышающую 1000 тыс. км². Прежде всего это река Обь, собирающая воду с обширного бассейна площадью 2990 тыс. км². Площади водосбора рек Енисей, Лена и Амур составляют соответственно 2580, 2490 и 1855 тыс. км². Волга – первая по величине река Европы – среди российских рек занимает лишь пятое место по площади бассейна (1360 тыс. км²).

К бассейну Северного Ледовитого океана, его окраинным морям (Баренцеву, Белому, Карскому, Лаптевых, Восточно-Сибирскому и Чукотскому) относится более половины территории России (65 %). Основную, центральную, часть этого бассейна занимают главные артерии страны – реки Обь, Енисей и Лена, между которыми расположены бассейны рек Таз, Пур, Пясина, Хатанга и др. К западной части бассейна Северного Ледовитого океана относятся бассейны рек Печора, Северная Двина и Онега, к восточной – бассейны рек Яна, Индигирка, Колыма и др.

Бассейну Тихого океана принадлежит около 19 % территории России. Речной сток поступает в окраинные моря Тихого океана – Берингово, Охотское и Японское. В северной части бассейна протекают реки Анадырь и Камчатка, в южной – Амур. Реки средней части бассейна Тихого океана представляют собой короткие водотоки с небольшими площадями бассейнов.

К бассейну Атлантического океана относится около 5 % площади России, сюда входит речная сеть, принадлежащая бассейнам Балтийского, Черного и Азовского морей. Наиболее крупными реками Балтийского бассейна являются Нева, Нарва, Западная Двина, Неман; бассейна Черного моря – река Днепр; бассейна Азовского моря – реки Дон, Кубань.

В нашей стране средняя антропогенная нагрузка на водные ресурсы (40 тыс. чел./км³) в три раза ниже среднемировой и совпадает с аналогичным показателем, например, в Канаде (рис. 2.8).

На юге Сибири, Дальнего Востока и в лесной зоне севера европейской части России величина АНВР увеличивается до 10–100 тыс. чел./км³ и совпадает с этим показателем для Северной и Южной Америки, Австралии и Океании. На большей части центра, юга европейской территории России и в лесостепной зоне юга Западной Сибири этот показатель достигает 100–500 тыс. чел./км³, что совпадает с величинами АНВР, средними для Европы, Азии и Африки, а также для Индии, Китая, Франции, центральных районов Турции, восточных частей Австрии и Венгрии, запада Румынии и Молдовы.

Максимальные величины АНВР (от 500–1000 тыс. чел./км³ до более 10 млн. чел./км³) отмечаются в наиболее обжитых сельскохозяйственных (юго-западных) районах России, а также в крупных агломерациях, что совпадает с показателями европейских стран (Румынии, Венгрии, Чехии, Австрии) в аналогичных зонах и значительно превышает средние величины для остальных континентов.

вод (58 раз) – в два раза выше среднемировой. Тем не менее в региональном плане эти показатели существенно изменяются: от менее 10 раз в Курганской, Оренбургской, Ростовской, Астраханской, Волгоградской и Саратовской областях до более 100 раз на большей части севера европейской территории, Сибири и Дальнего Востока (кроме Приморского края) (рис. 2.9).

1. В конце XX века безвозвратное водопотребление в бассейнах Днепра и Дуная достигало 17–30 %, в бассейне Азовского моря – более 50 % (20 км³/год), а в бассейне Каспия – 10–20 %. Для рек Дальнего Востока этот показатель составил 3 %.

2. В течение 1988–1998 гг. загрязнение речных вод в среднем по России превышало предельно допустимые концентрации (ПДК) по нефтепродуктам (56–61 %), фенолам (37,5–42,5 %), органическим веществам (31–54 %), аммонийному азоту (29,3–32,3 %), нитратному азоту (24,6–27,5 %), соединениям меди (74,1–79,9 %). Наибольшая загрязненность (до сотых долей мкг/л) речных вод ХОП в 1991–1993 гг. отмечена в бассейнах Волги, Оби, Амура, Урала, Днепра, Терека, Пясины.

3. Населенные пункты и промышленные предприятия, расположенные на побережьях России, ежегодно сбрасывают в моря до 9 млн. м³ сточных вод. Около 50 % этих стоков получает Каспийское море, причем 77 % из этого количества дает Дагестан. С учетом объемов сточных вод с побережий сопредельных государств удельная нагрузка ими максимальна для акватории Азовского моря – 130 л/м², затем следует Каспийское (60 л), Белое (10 л), Черное (2 л) моря.

4. Со сточными водами городов и предприятий побережья прибрежные воды морей России в последнее десятилетие XX века получали более 8 тыс. т НУ, около 100 тыс. т фенолов, более 700 тыс. т детергентов и 100 тыс. т взвешенных веществ, примерно по 10 т Cu, Cr и Zn, по несколько сотен тонн Fe, до 10 тыс. т аммиака.

5. По косвенным данным (табл. 2.5), в пяти регионах России: Московской, Курганской, Челябинской областях, Приморском и Краснодарском краях, поверхностные воды «сильно загрязнены», в 47 регионах они «средне загрязнены», в 29 – загрязнены слабо и лишь в шести регионах северо-восточной Сибири и Камчатки они относятся к категории «относительно чистые» (рис. 2.10).

Для внутренних морей России речной сток является важнейшей составляющей водного баланса. Его количественные и качественные изменения, несмотря на существенные различия в размерах площадей водосборных бассейнов, принципиальным образом влияют на состояние гидрологического и гидрохимического режимов как прибрежных акваторий, так и водоемов в целом. В Каспийском море, например, доля речного стока в приходной части баланса составляет около 80 %, в Черном и Азовском она достигает 42–45 % (табл. 2.6).

Таблица 2.5.

**Косвенные критерии состояния водных объектов
[Антропогенные..., 2003]**

Класс вод по гидробиологическим показателям	Вид антропогенной нагрузки		
	Общая численность населения в бассейне, (млн. чел./км ³ годового стока)	Кратность разбавления сточных вод годовым стоком, (раз)	
		Все сточные воды	Загрязненные сточные воды
I–II Относительно чистые	< 0,01	> 500	> 1000
III Слабозагрязненные	0,01–0,15	500–15	1000–50
IV–V Среднезагрязненные	0,15–0,5	15–5	50–10
V–VI Сильнозагрязненные	> 0,5	< 5	< 10

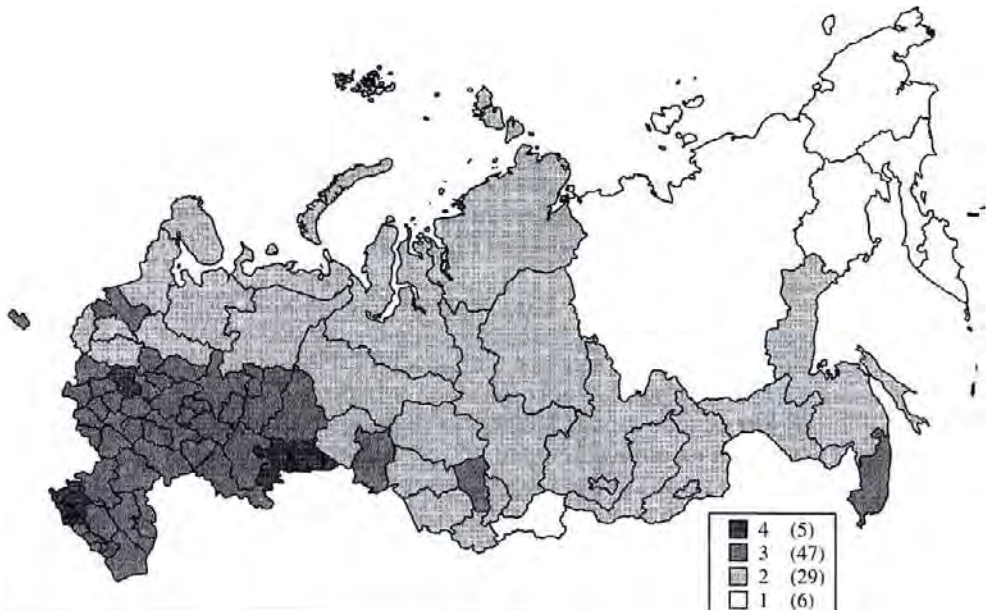


Рис. 2.10. Оценка состояния качества поверхностных вод России по косвенным признакам [Антропогенные..., 2003].

(1 – относительно чистые; 2– слабозагрязненные;
3 – среднезагрязненные; 4 – сильнозагрязненные.)

Таблица 2.6.

Водный баланс внутренних морей России
[Азовское..., 1991; Каспийское..., 1992; Черное...,1991]

МОРЯ	Объем вод (тыс. км ³)	Пло- щадь водо- сбора (тыс. км ²)	Составляющие водного баланса (км ³ /год)			
			реки		осадки	
			сред.	max	сред.	max
Черное	546	1874,9	338	491	237	322
Азовское	0,29	500	37	40,4	15,5	16,1
Каспий- ское	78,1	≈ 2000	300	335	76,6	85

Продолжение табл. 2.6.

МОРЯ	Объем вод (тыс. км ²)	Пло- щадь водо- сбора (тыс. км ²)	Составляющие водного баланса (км ² /год)				СУММА	
			испарение		проливы		+	-
			сред.	max	+	-		
Черное	546	1874,9	396	484	225	404	≈800	≈800
Азовское	0,29	500	34,6	35,1	36,7	53,6	≈90	≈90
Каспий- ское	78,1	≈2000	376	395	0	0	≈376	≈376

Бассейн Каспийского моря. Каспийское море – внутренний водоем, не имеющий связи с океаном. Его площадь составляет 386,4 тыс. км², объем воды – 78 тыс. м³. Площадь водосборного бассейна – около 3,5 млн. км². Несмотря на обширность водосбора, только 62,6 % его площади приходится на сточные области, около 26,1 % – на области с незначительным стоком и 11,3 % – на бессточные (рис. 2.11). В Каспий впадают 130 рек, но почти все они расположены на севере и западе, а восточный берег вообще не имеет ни одной реки, достигающей моря. Крупнейшая река бассейна Каспия – Волга, обеспечивающая 78 % поступающих в море речных вод (в бассейне этой реки расположено более 25 %

хозяйств России, и это, несомненно, определяет многие гидрохимические и прочие особенности вод Каспийского моря), а также реки Кура, Жайык (Урал), Терек, Сулак, Самур. Диапазон колебаний значений коэффициента антропогенной нагрузки (КАНВР) на водные ресурсы территории водосбора Каспийского моря составляет от менее 30 тыс. до почти 4 млн. человек на км³ стока.

Регулярные наблюдения за режимом Волги начаты с 1792 г., а других рек – с 1876 г. Среднегодовой сток за этот период составил 255 км³ (> 80 % это воды Волги). Статистический анализ волжского стока за 114 лет (1881–1995 гг.) у Волгограда выявил за это время полный 23-летний цикл. Он включил в себя 11-летний период снижения годового стока Волги в 2,5 раза (с 385 до 159 км³/год в 1926–1938 гг.) и аналогичный по продолжительности период повышения стока в 2,1 раза (со 159 до 333 км³/год в 1938–1949 гг.). За последние 60 лет отъем стока в результате хозяйственной деятельности составлял <17 км³/год (или 7 % среднегодового естественного стока).

Водосбор Волги. В этой зоне максимальное значение КАНВР наблюдается на территории Астраханской области (3,87 млн. чел./км³) и в Республике Калмыкии (1,05 млн. чел./км³). Высокие значения достигаются в Самарской (830 тыс. чел./км³), Московской (660 тыс. чел./км³) и Волгоградской (630 тыс. чел./км³) областях.

Значения КАНВР в пределах от 300 до 600 тыс. чел./км³ наблюдаются в Тульской, Ульяновской, Пензенской, Саратовской областях, а также в Республиках Татарстан и Чувашии.

Значения данного коэффициента в пределах от 100 до 300 тыс. чел./км³ наблюдаются в Ярославской, Калужской, Орловской, Рязанской, Владимирской, Ивановской, Нижегородской и Тамбов-

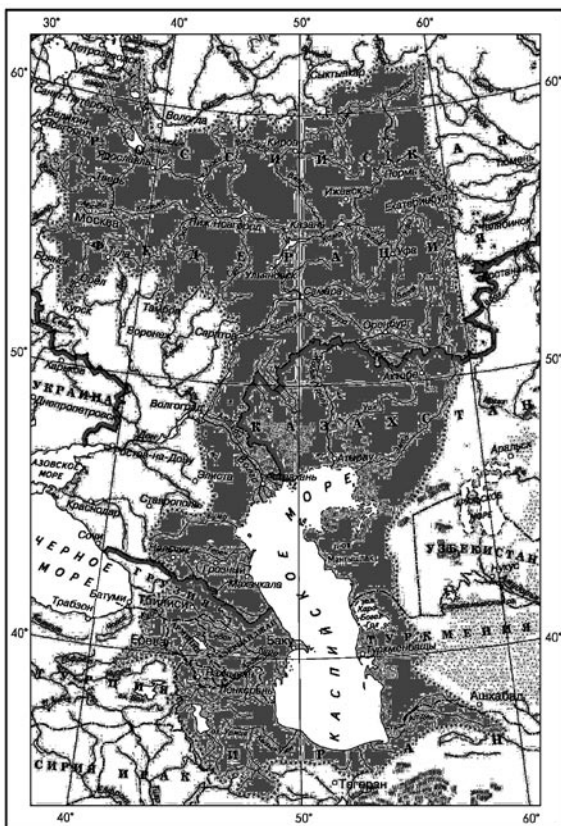


Рис. 2.11. Водосборный бассейн Каспийского моря
[Национальный атлас..., 2008].

ской областях, а также в Республиках Марий Эл, Удмуртии, Башкортостан и Мордовии.

Самые низкие значения наблюдаются в Тверской, Вологодской, Кировской и Костромской областях, а также в Пермском крае (менее 100 тыс. чел./км³).

Водосбор Урала. В данный водосбор входят территории двух государств – России и Казахстана, и коэффициент антропогенной нагрузки распределяется здесь в значениях от 100 до 500 тыс. чел./км³. Более крупные значения на территории Казахстана – в Атырауской области (500 тыс. чел./км³), а на территории России – в Оренбургской области (300 тыс. чел./км³). В Актюбинской и Западно-Казахстанской областях Казахстана значения коэффициента – 100 и 180 тыс. чел./км³ соответственно.

Водосбор Терека и Куры. В этой зоне максимальное значение КАНБР наблюдается на территории Республики Дагестан (2,13 млн. чел./км³). Высокие показатели данного коэффициента отмечаются на территории Армении (740 чел./км³) и на территории Ставропольского края (850 тыс. чел./км³).

Значения КАНБР в пределах от 300 до 600 тыс. чел./км³ наблюдаются на территории Республик Ингушетии и Кабардино-Балкарии, а также на территории Азербайджана (410 тыс. чел./км³). Самые низкие на территории данного водосбора показатели отмечаются в восточной Грузии (130 тыс. чел./км³), а также в Чеченской республике (290 тыс. чел./км³) и в Северной Осетии (270 тыс. чел./км³). В двух областях, не относящихся к территориям какого-либо из водосборов, но прилегающих непосредственно к Каспийскому морю, – Мангистауская область Казахстана и Балканская область Туркменистана – показатели антропогенной нагрузки на водные ресурсы довольно высоки и составляют 1,0 и 1,25 млн. чел./км³ соответственно.

Основным источником загрязнения вод северного Каспия является поступление загрязняющих веществ (ЗВ) из бассейнов р. Волга, Урал, Кума, Терек, Сулак, Самур. Строительство каскада из девяти водохранилищ на Волге, ее притоках (десять плотин) и других реках водосбора (Терек и Кура – по три плотины, Сулак – две плотины), отбор воды на орошение из отдельных рек водосбора Каспийского моря отразились на режиме и объемах пресного стока в водоем. Среднегодовой сток Волги у г. Волгоград в 50-х гг. XX века (после начала его интенсивного зарегулирования) уменьшился с 233 до 229 км³. При этом объем весеннего половодья сократился в 1,5 раза, а сток в зимнюю межень возрос в 1,5–2 раза. Безвозвратное водопотребление на реках бассейна Каспийского моря составляет 10–20 % их годового стока.

Согласно расчетам, реки бассейна вносят в Каспийское море ежегодно в среднем 41 тыс. т фосфора, около 400 тыс. т азота, около 2,5 млн. т растворенного органического вещества и 800 тыс. т минерального кремния. При этом поступление указанных биогенных соединений со стоком Волги превышает суммарное от пяти ее притоков (Урал, Терек, Сулак, Самур и Кура)

в 18,3; 6; 7,8 и 4,6 раза соответственно. По модулю сток Волги характеризуется максимальным среднемноголетним выносом общего Р (0,27 кг/га), сток Сулака – наибольшим выносом общего N (4,93 кг/га), сток Самура – растворенного $C_{орг}$ (27,30 кг/га), а сток Терека – Si (15,24 кг/га).

Суммарное годовое поступление ОВ в водоем оценивается в 175–360 тыс. т Р и 1000–2800 тыс. т N. Концентрации основных элементов ОВ (С, N и Р) в водах северного и среднего Каспия составляют соответственно 5–20, 0,28–0,98 и 0,030–0,155 мг/л, что для всех элементов по средним значениям примерно в два раза выше, чем в Черном и Белом морях.

Воды одного из основных притоков Волги – реки Оки в зоне Московской области содержат до 7–15 ПДК нитратного азота, 8–16 ПДК меди, 10–22 ПДК формальдегидов. В реке Москва (д. Нижнее Мячково) эти показатели по меди составляют 18–38, железу 16–48, нитратному азоту 19–45, формальдегиду 19–21 ПДК. В водохранилищах Камы они доходят по фенолам до 1–6, нефтяным углеводородам (НУ) 1–12, меди 1–10, марганцу 7–17, железу до 9–24 ПДК. Волжские водохранилища загрязнены НУ до 3–5 ПДК (Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское), фенолами до 3 (Саратовское), медью до 1–5 ПДК (Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское).

Содержание меди и цинка в водах нижней Волги в 1993–1995 гг. составляло 3–20 и 2–5 ПДК соответственно, а концентрации хлорорганических пестицидов (ХОП) здесь достигали 14 нг/л при требовании их полного отсутствия. Почти в 40 % пунктов наблюдений в бассейне Волги в 25–28 % проб воды присутствуют ХОП класса ГХЦГ. Здесь же в 60 % пунктов в 30 % проб присутствует трифлуралин. В 1991–1993 гг. максимальное содержание α и γ -ГХЦГ в водах Волги было 3–7, а ДДТ – 3,36 мкг/л. Эти максимумы отмечаются в местах прежних и современных производств ХОП. В верхнем течении Волги это район Нижнего Новгорода, а в среднем – устье р. Чапаевка на участке Самара–Балаково. В низовьях Волги (Волгоград–Астрахань) аномалии ХОП связаны с интенсивным сельскохозяйственным производством в условиях богарного и орошаемого земледелия.

Загрязнение вод притока Терека р. Камбилеевка у г. Беслана аммонием, нитратами, НУ, Cu, Zn может превышать 3000 (!) ПДК. В р. Терек у Владикавказа и Моздока среднегодовое содержание этих токсикантов составляет 2–5, при максимуме 8–20 ПДК. Аналогичное загрязнение наблюдается в р. Урал и ее притоке р. Белява у г. Медногорска из-за плохой очистки стоков медно-серного комбината. В 50 % пунктов наблюдений и в 16 % проб в водах р. Терек обнаружены изомеры ГХЦГ. В водах р. Урал это соотношение составляет 97 и 46–50 %. В конце XX века в бассейнах этих рек отмечена положительная тенденция загрязнения ХОП.

В итоге Каспийское море в последнее десятилетие XX века ежегодно получало со стоком Волги от 40 до 90 (в зависимости от во-

дности), а с территории побережья – 29 тыс. т НУ, 0,5–1 млн. т фенолов, 1,5–3 тыс. т Cu, 3,7–7,4 тыс. т Zn, 3–5 т всех видов ХОС и 5–10 т всех изомеров ГХЦГ (фото 2.8, табл. 2.7). По данным 1986–1992 гг., эти цифры по НУ составляли 44,5–157,6, по фенолам – 367–1390, детергентам – 12,2, аммонийному азоту – 27,4, Cu – 0,9–2,7, Zn – 7,7–14 тыс. т.



Фото 2.8. Дельта Волги оказывается конечным перед морем звеном в системе аккумуляции и трансформации продуктов хозяйственной деятельности.

Таблица 2.7.

Поступление растворенных загрязняющих веществ в Каспийское море со стоком р. Волга [Устьевая область..., 1998].
(НУ, Ф, СПАВ, ВВ – тыс. т; Cu, Zn – т.;
α-гхцг, γ-гхцг, ДДЭ, ДДТ – кг)

Тип года	Вид загрязняющего вещества				
	НУ	Ф	СПАВ	ВВ	Cu
Средн.	71,22	784,6	4,47	11723	2223
Многовод.	93,59	1032,8	5,77	15128	2886
Маловод.	41,83	527,4	2,95	7879	1572

Тип года	Вид загрязняющего вещества				
	Zn	α -гхцг	γ -гхцг	ДДЭ	ДДТ
Средн.	5581	4057	3097,6	769,9	3665,7
Многовод.	7377	5453	4170	994	4811
Маловод.	3767	2786	2129	508	2451

Кроме того, в 1991 г., например, Каспий получал 86 % НУ, 100 % фенолов и детергентов, 30–40 % Cu, Zn и Fe, поступивших в моря России со стоками городов и предприятий российского побережья. В количественном выражении это составляет: нефтепродуктов 6,9, фенолов 97,3, детергентов 757,5 тыс. т, Cu, Zn и Fe – 3,1, 3,7 и 91,3 тонны.

Качество волжской воды по многим гидрохимическим показателям (NH_4 , NO_3) оценивается как «неудовлетворительное». Крупнейшие регионы водосбора Волги (Московский, Среднее Поволжье и Прикамье, Северный Каспий, Калмыкия) находятся в условиях острой экологической обстановки. Волга в своем нижнем течении (Тверца-Астрахань) стала водотоком «качественного истощения». Концентрации меди и цинка в водах нижней Волги в 1993–1995 гг. превышали ПДК в 3–20 и 2–5 раз соответственно, а концентрации ХОП здесь достигали 14 нг/л при требовании их полного отсутствия.

Качество воды рек бассейна р. Терек изменяется от «слабозагрязненной» (р. Цей) до «очень грязной» (р. Баксан) и «чрезвычайно грязной» (р. Камбилеевка). В последней реке у города Беслан уровень загрязнения вод аммонийным и нитратным азотом, нефтепродуктами, соединениями меди и цинка превышает 3000 ПДК. В р. Терек у городов Владикавказ и Моздок среднегодовые концентрации этих токсикантов составляют 2–5, а максимальные – 8–20 ПДК.

В бассейне р. Урал загрязнена р. Блява у г. Медногорска из-за плохой работы очистных сооружений Медногорского медно-серного комбината. В водах р. Кума в районе Минеральных Вод и Зеленокумска содержание рассматриваемых токсикантов составляет 2–4 ПДК.

Отмеченный высокий уровень загрязнения речного стока в бассейне Каспийского моря не является исключением в системе рек Российской Федерации. В реках Дальнего Востока, например, в 1980–1996 гг. максимальные концентрации нефтепродуктов и фенолов превышали ПДК в 60–1300 и 20–240 раз соответственно.

Бассейн Черного моря. Черное море является наиболее обособленной частью Атлантического океана. Его площадь равна 422 тыс. км², объем вод – 555 тыс. км³, средняя глубина – 1315 м, наиболь-

шая глубина – 2210 м. Из 1874904 км² площади водосбора Черного моря 44 % составляет водосбор Дуная (817000 км²), 27 % – Днестра (505810 км²), 14 % – рек Турции (259550 км²), по 4 % – рек Грузии (75000 км²), Днестра (71990 км²) и Ю. Буга (68000 км²). Только 3 % площади черноморского водосбора, включающей побережье Крыма, Северного Кавказа, Румынии, Болгарии, отдельных районов Украины и Турции, имеет незначительный сток (рис. 2.12). Основная часть речного стока (до 80 %) поступает в северо-западную часть Черного моря, куда несут воды наиболее крупные реки: Дунай (200 км³ в год), Днепр (50 км³ в год), Днестр (10 км³ в год). На Черноморском побережье Кавказа в море впадают реки: Ингури, Риони, Чорх и много мелких речек. На остальной части побережья сток незначителен.



Рис. 2.12. Водосборный бассейн Черного моря
[Национальный атлас..., 2008].

Нагрузка населения на водные ресурсы черноморского водосбора изменяется от 10 тысяч до 20 миллионов человек на км³ речного стока, превышая по максимальным значениям в 50–100 раз средний для Европы уровень (240 тыс. чел./км³) и в 20–40 раз – уровень стран-рекордсменов по этому показателю Германии (760) и Индии (530 тыс. чел./км³). При этом ее максимумы наблюдаются на водосборе Дуная в Румынии (20 млн. чел./км³), Венгрии (7,5 млн. чел./км³), Чехии и Австрии (1–2 млн. чел./км³).

На водосборах Днестра, Южного Буга и Днепра максимальное количество населения, приходящееся на 1 км³ стока, равно 7,5 млн. человек (Одесская, Николаевская, Днепропетровская, Запорожская области). На водосборах рек Северного Кавказа, Грузии и Турции этот показатель составляет 10–100 тыс. чел./км³ при максимуме в засушливых центральных областях Турции (до 2 млн. чел./км³).

В 1992–1993 гг. на Днестре в воде Запорожского вдхр. содержание НУ составляло 3–10 мг/л (10–30 ПДК). В Днепродзержинском этот показатель превышал ПДК в 1,5–2 раза, а в Каховском содержание НУ в месте впадения реки Мокрая Московка было выше нормы в 100 раз (28–30 мг/л). Содержание тяжелых металлов (Co, Cd, Ni, Pb, Mn, Fe) в водах притоков Днепра р. Мокрая Сура, Самара, Орель составляло 1,5–3 ПДК, а НУ – до 10 ПДК.

Практически весь сток соединений фосфора и азота поступает в водоем с водами Дуная и Днепра (около 80 и 600 тыс. т соответственно). Вклад Дуная по обеим характеристикам в 12 раз выше, чем вклад Днепра. К началу 80-х гг., по сравнению с 1958–59 гг., концентрации минеральных форм фосфора и азота в водах этих рек возросли в 5–7 раз, а в 1984–89 гг. в водах Дуная содержание общего и аммонийного азота было в 1,5 и 7 раз выше, чем в 1980–85 гг. Сток биогенных веществ с побережья составляет менее 2 % суммарного, из которых по 30–40 % приходится на районы Севастополя, ЮБК, Краснодарского края, а 10–15 % – на северо-западную часть моря (СЗЧМ).

60 и 36 % NH₄⁺ (около 9 тыс. т/год) Черное море получает с водами Дуная и Днепра соответственно, около 5 % сбрасывают предприятия побережья. Из последних только 4 % поступает в СЗЧМ, остальной запас аммонийного азота поставляется сточными водами предприятий Крыма и Кавказа. Однако в отдельные годы сброс NH₄⁺ и Робщ с побережья (2–5 и 3–7 тыс. т/год соответственно) почти достигает дунайского и днепровского уровней.

Среднегодовое содержание НУ в водах Дуная и Днепра в период 1980–90 гг. превышало ПДК в 3–5, а по максимальным величинам – в 6,8–8,6 раза (фото 2.9). Среднегодовые концентрации фенолов в стоке этих рек в конце XX века превышали предельно допустимые (1 мкг/л) в 4–5 раз. В 1991–1993 гг. в российской зоне водосбора Днепра присутствие ХОП в водах реки отмечено в 60–70 % пунктов в 20–25 % проб. В 37 % пунктов наблюдений в 20 % проб отмечалось присутствие трифлуралина в концентрациях до 0,183 мкг/л. Максимальные концентрации других видов ХОП достигали 0,22 (ДДЭ), 0,44 (ДДТ), 0,113 (α-ГХЦГ) мкг/л. В 2000 г. после аварии на предприятии «РЕМІN S.F.» в г. Бая-Бурса (Румыния) в створе г. Рени на Дунае содержание Cu и Fe в речной воде составляло 24 ПДК, а Zn – 5 ПДК.

В Черное море в течение 1980–1989 гг. поступало ежегодно в среднем 80 тыс. т нефтепродуктов (примерно 65 % из них – со стоком рек, причем с водами Дуная в 3,5 раза больше, чем со стоком Днепра). В этот же период Черное море ежегодно получало с



Фото 2.9. *Через дельту Дуная в Черное море поступают сточные воды восьми государств Европы.*

речным стоком до 1 тыс. т фенолов (соответственно 80 и 20 % из Дуная и Днестра). Кроме того, с водами Дуная и Днестра Черное море ежегодно получало более 20 и 1 т ХОП соответственно. За период 1980–89 гг. реки западной Грузии поставляли в юго-восточную часть Черного моря в среднем по 5,8 т различных видов ХОП.

По сведениям международной программы мониторинга и качества вод реки Дунай, в 1988–89 гг. с ее стоком Черное море получало в среднем за год 55 т ртути, 500 т кадмия, 900 т меди, 3000 т свинца, 4500 т марганца. Естественное ежегодное поступление в Черное море ТМ с речным стоком составляет: ртути – 290 кг, меди – 4150, свинца – 2250, кадмия – 290, цинка – 14200, никеля – 2920 тонн.

Ежегодно (1980–1989 гг.) в Черное море со стоком Дуная и Днестра поступало по 30, с побережья Краснодарского края – 20, юго-западного Крыма – 10, из районов Одессы, южного берега Крыма (ЮБК) и Грузии – по 5 % общего объема сточных вод, составляющего примерно 1 км³/год. Из 1,5–2 тыс. т суммарного количества НУ, поступающего в среднем за год в водоем со сточными водами предприятий побережья, на районы Одессы и Батуми приходилось по 30, Севастополя – 20, Краснодарского края и ЮБК – по

15 %. С учетом недостатков информации по НУ можно полагать, что их годовое поступление в 1990-х гг. из этого источника составляло 10–12 тыс. т (примерно 10 % суммарного).

Сведений о поступлении в Черное море фенолов со сточными водами предприятий очень мало. Наибольшее их количество (по сравнению с заводами Севастополя, Поти, Батуми) дает Туапсинский нефтеперерабатывающий завод (1–3 т токсиканта ежегодно). Только в 1991 г. со сточными водами городов и предприятий побережья от Анапы до Сочи в Черное море поступило 44 т НУ, 1 т фенолов, 55 т детергентов, 4417 т соединений азота, 493 т соединений фосфора.

Бассейн Азовского моря. Азовское море – самое мелководное и одно из самых маленьких морей мира. Его площадь – 39 тыс. км², объем воды – 290 км³, средняя глубина – 7 м, наибольшая глубина – 15 м. Почти весь речной сток в море (более 90 %) дают реки Дон и Кубань. Подавляющая часть стока приходится на весенне-летний сезон.

Основной обмен вод Азовского моря происходит через Керченский пролив с Черным морем. По среднемноголетним данным, из Азовского моря поверхностным стоком ежегодно вытекает около 49 км³ воды. Результирующий сток воды из Азовского моря в Черное составляет около 15 км³/год. Речная сеть водосборного бассейна Азовского моря (рис. 2.13). кроме крупных рр. Дон (1870 км) и Кубань (870 км) включает около 20 малых рек, берущих начало в пределах Азово-Кубанской равнины. Самые значительные из них: Ея (311 км), Челбас (288 км), Бейсуг (193 км), Кагальник (162 км), Правый Бейсужек (68 км), Мокрая Чембурка (51 км), Албаши (23 км). Дон относится к рекам с весенним половодьем (70 % стока), так как имеет преимущественно (67 %) снеговое питание, а Кубань из-за снегово-ледникового (85 %) питания – с весенне-летним (62 % стока в апреле-августе) половодьем. Наблюдения за стоком Дона ведутся с 1891 г., Куба-

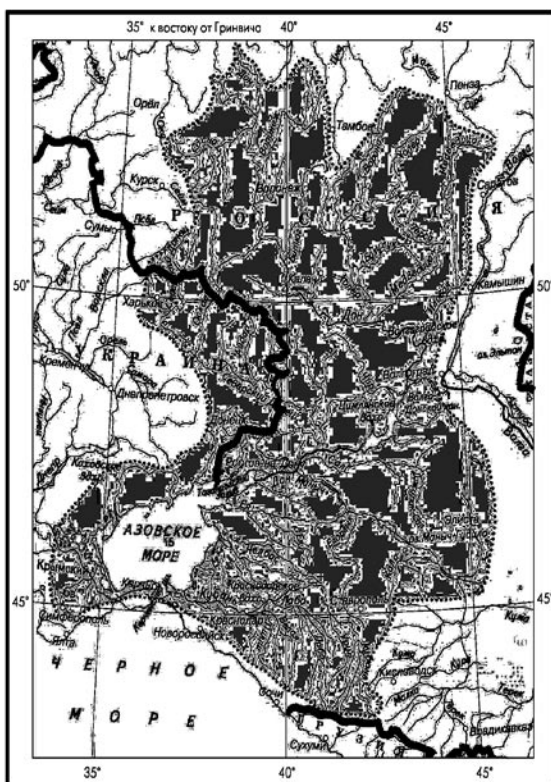


Рис. 2.13. Водосборный бассейн Азовского моря
[Национальный атлас..., 2008].

ни – с 1912-го, а малых рек – с 1950 г. Суммарный речной сток в Азовское море составляет 43,5 км³/год, из которых рр. Дон и Кубань дают соответственно 27,9 и 13,5, а малые реки Приазовья – 2,1 км³/год.

В бассейне Азовского моря максимальная нагрузка населения на водные ресурсы (2–4 млн. чел./км³) отмечена на водосборе Дона (Харьковская, север Донецкой, запад Луганской областей Украины, центр Ростовской области России) и водосборе правого берега Кубани (север Краснодарского края, юг Ростовской области и северо-запад Ставрополья).

Содержание НУ в р. Дон из-за интенсивного судоходства от Ростова-на-Дону, Азова и до устья реки изменяется от 3 до 4–6 ПДК. В р. Кубань ниже Краснодара среднегодовое содержание этого вида токсикантов составляет 2,5–5 ПДК, а в притоках Кубани в отдельные годы этот показатель превышает 6–8 ПДК.

В 1992–1996 гг. в 23–27 % пунктов наблюдений на р. Дон в 10–12 % случаев обнаружены изомеры ГХЦГ, а в 42 % пунктов в 28 % случаев – трифлуралин. Максимальные концентрации α и γ -ГХЦГ при этом достигали 0,180 и 1,531, а трифлуралина – 1,392 мкг/л. В р. Кубань γ -ГХЦГ обнаруживали в 42 % пунктов наблюдений в 10 % проб, а максимум концентраций составлял 0,101 мкг/л.

В итоге в начале последнего десятилетия XX века в Таганрогский залив Азовского моря (взморье р. Дон) с речным стоком ежегодно поступало более 35 тыс. т НУ, около 500–700 т детергентов, 10–40 т меди, 20–95 т цинка, до 10 т ртути, около 100 кг ХОП. В Темрюкский залив Азовского моря (взморье р. Кубань) в этот период река вносила ежегодно более 5 тыс. т. НУ, до сотен тонн детергентов и ХОП, десятки тонн Cu, Zn.

Поступление в Азовское море всех указанных токсикантов со сточными водами предприятий и городов побережья в это время было на два-три порядка ниже. В 1991 г., например, этот показатель по НУ составлял 147 т, по детергентам – 79 т, по Cu, Zn, Fe, Сг соответственно 0,4; 0,4; 50,7; 9,8 т, а по аммиаку – 730 т.

Суммарное количество ХОП в водах Азовского моря с 1983 по 1990 г. возросло в 17 раз (в Таганрогском заливе – в 27). За этот период среднегодовая их концентрация увеличилась в четыре-пять раз. В воде кубанских лиманов содержание ядохимикатов превышает норму в сотни раз. Тем не менее на большей части акватории водоема содержание ПХБ в печени камбалы-калкан (0,45–0,47 мг/кг), гонадах и печени осетровых (0,33 и 0,1 мг/кг) не превышает максимально допустимый уровень (МДУ). В то же время в печени кефали-пиленгаса из Обиточного залива зафиксирована концентрация ХОП, превышающая МДУ в 40 раз, а у этого вида, обитающего в Молочном лимане, она постоянно составляют 150–200 мг/кг (300–400 МДУ). Кефаль-пиленгас из Молочного лимана Азовского моря из-за высокого содержания в ней ХОП в пищу не пригодна, а потребление выловленной в Обиточ-

ном заливе рыбы этого вида не должно превышать 250–300 г в сутки. Концентрации меди и свинца в печени пиленгаса из Азовского моря составляет 1,9 и 125 МДУ соответственно; содержание свинца и цинка в гонадах осетров здесь в 1,5–3 и 1,3–1,6 раза выше нормы, а в тканях и печени севрюги содержание цинка может достигать 1,3–3,4 МДУ.

Бассейны морей севера европейской части России. Балтийское море. Площадь моря равна 419 тыс. км², объем вод – 21,5 тыс. км³, средняя глубина – 51 м, наибольшая глубина – 470 м. В Балтийское море впадает около 250 рек. Крупнейшие реки: Висла, Одер, Неман, Даугава, Нева. Наибольшее количество воды приносит за год Нева – в среднем 83,5 км³.

На водосборе Балтийского моря (рис. 2.14) диапазон колебаний коэффициента антропогенной нагрузки на водные ресурсы составляет от 10 тыс. до 12 млн. чел./км³ стока. При этом максимальные его величины отмечаются в бассейнах рек Одер (12 млн. чел./км³), Висла (4 млн. чел./км³), Неман (3,4 млн. чел./км³), Перголь (2,5 млн. чел./км³), а также на части водосбора Западной Двины (4,5 млн. чел./км³). Северная и северо-западная части водосборного бассейна Балтийского моря приурочены к горным районам с низкой плотностью населения, что определяет здесь минимальную антропогенную нагрузку (менее 10 тыс. чел./км³) на водные ресурсы.

Ежегодно Балтийское море получает с речным стоком: цинка – 12 тыс. т, меди – 4 тыс. т, свинца – 3 тыс. т, кадмия – 50 т, ртути – 33 т, полихлорированных бифенилов (ПХБ) – 9 т, нефтепродуктов – 50–100 тыс. т, органического вещества – 7–10 млн. т, азота – 1–2 млн. т, фосфора – 100–150 млн. т. Максимальный вклад

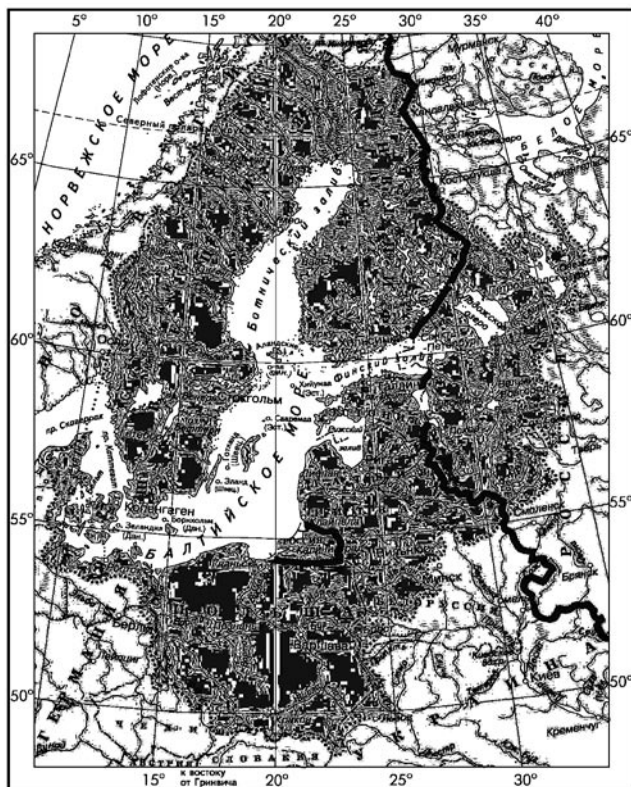


Рис. 2.14. Водосборный бассейн Балтийского моря
[Национальный атлас..., 2008].

в загрязнение вод р. Невы вносят предприятия и коммунальные стоки г. Санкт-Петербурга – 50 % по соединениям азота и фосфора, 60 % – по НУ. В 20 % пунктов наблюдений на рр. Нева и Луга с 7–10 % проб находят изомеры ГХЦГ и ДДТ в концентрациях 0,023–0,06 мкг/л. В 1989 г. Балтика со сточными водами с побережья России получила 313 т НУ, 40 кг фенолов, 90,6 т детергентов, 22 тыс. т взвешенных веществ, по 1–2 т Cu, Zn, Fe, Cr, 2905 т аммиака.

Баренцево море. Одно из самых больших по площади морей. Его площадь – 1424 тыс. км², объем вод – 316 тыс. км³, средняя глубина – 222 м, наибольшая глубина – 513 м. Речной сток по отношению к площади и объему моря невелик и равен в среднем 163 км³ в год. На 90 % он сосредоточен в юго-восточной части моря. В этот район несут свои воды самые крупные реки Баренцевоморского бассейна (рис. 2.15). Река Печора сбрасывает в средний по водности год около 130 км³ воды, что составляет примерно 70 % всего берегового стока в море за год. Сюда же впадают

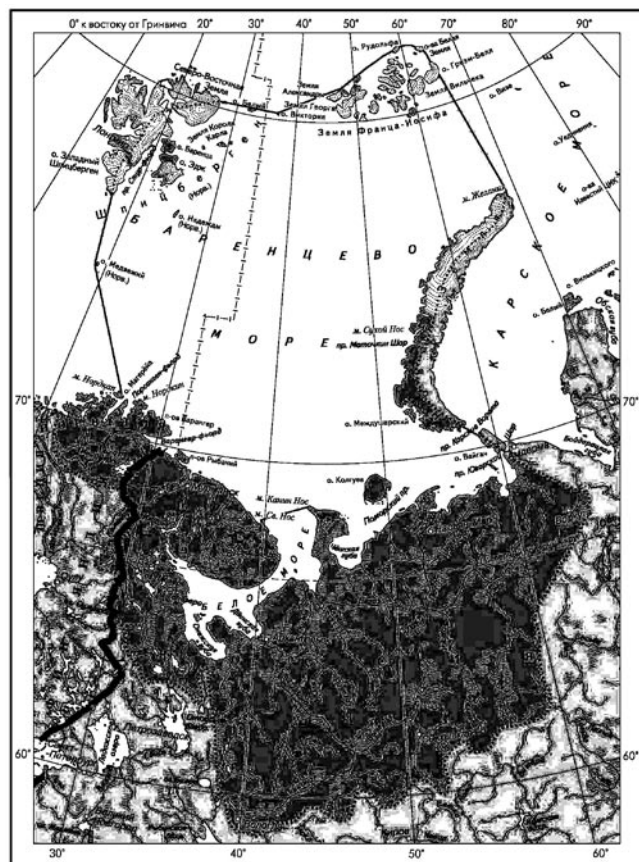


Рис. 2.15. Водосборный бассейн Баренцева и Белого морей [Национальный атлас..., 2008].

и несколько мелких рек – Кола, Тулома и др. На северное побережье Норвегии и берег Кольского полуострова приходится всего около 10 % стока. Здесь в море стекают небольшие реки горного типа. Максимальный материковый сток наблюдается весной, минимальный – осенью и зимой.

На водосборе Баренцева моря максимальные концентрации меди и никеля в отдельных малых реках Кольского полуострова постоянно превышают 100 ПДК. В большинстве рек этого бассейна среднегодовое содержание меди достигает 5–20 ПДК, в отдельных (импактных) районах – 38–2800 ПДК. В районах гг. Никель,

Заполярный, Мурманск, Мончегорск высок уровень «хронического загрязнения» речных вод кобальтом, марганцем, дитиофосфатом, органическими веществами, аммонийным и нитритным азотом, нефтепродуктами. В 85 % случаев здесь наблюдается экстремально высокое загрязнение речных вод. Кроме того, в реках и озерах Кольского п-ва в 66–71 % пунктов наблюдений в 23 % случаев находят изомеры ГХЦГ в максимальных концентрациях до 0–154 мкг/л.

В 73 % пунктов наблюдений в 31–38 % проб воды р. Печора обнаруживают изомеры ГХЦГ в концентрациях до 0,040 мкг/л, а содержание ДДТ здесь может достигать 11–38 мг/л. В бассейне рр. Воркута и Ухта, где расположены крупные нефтедобывающие и нефтеперерабатывающие отрасли Республики Коми, отмечается высокий уровень загрязнения речных вод НУ. В итоге только в 1991 г. в Баренцево море со стоком рек поступило 2183 т НУ, 130 т фенолов, 502 т детергентов, более 26 тыс. т взвешенных веществ, 16 т Cu, 2 т Zn, 1335 т Fe, более 1 т ХОП. В этом же году со сточными водами предприятий побережья Баренцево море получило 73 т НУ, 62 т детергентов, десятки килограммов тяжелых металлов.

Белое море. Относится к внутренним морям. Его площадь равна 90,1 тыс. км², объем вод – 6 тыс. км³, средняя глубина – 67 м, наибольшая глубина – 351 м. Впадающие в Белое море реки ежегодно приносят около 215 км³ пресной воды. Более 3/4 всего стока приходится на реки, впадающие в заливы: Онежская губа, Двинская губа, Мезенская губа (рис. 2.16).

В многоводные годы Северная Двина вносит около 170 км³, Мезень – 38 км³, Онега – 27 км³ воды в год. Впадающие на западном побережье моря реки Кемь и Выг дают соответственно 12 км³ и 11 км³ воды в год. Другие реки дают всего 9 % стока. Большие реки весной сбрасывают 60–70 % воды. Максимум стока наблюдается весной и составляет 40 % годового стока. Для моря в целом максимальный сток приходится на май, минимальный – на февраль-март. За год возобновляется более 2/3 всей массы глубинной (ниже 50 м) беломорской воды.

На водосборе Белого моря показатель нагрузки населения на водные ресурсы изменяется в среднем от 5 до 40 тыс. чел./км³ – совпадает со средним по России. Максимальные его значения отмечаются в промышленных центрах бассейна Северной Двины – в Вологодском (316 тыс. чел./км³) и Сыктывдинском (112 тыс. чел./км³) районах. Высокие значения индекса (40–100 тыс. чел./км³) приходятся также на такие промышленные центры в бассейне Северной Двины, как Приморский, Котласский и Сокольский районы, а также на промышленные центры на водосборе Нивы – гг. Апатиты, Оленегорск, Мончегорск, Полярные Зори.

В Северную Двину ежегодно сбрасывают 700 млн. м³ сточных вод предприятия целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности (фото 2.10). В районах Архангельска и Новодвинска воды реки содержат до 5–26 ПДК лигносульфо-

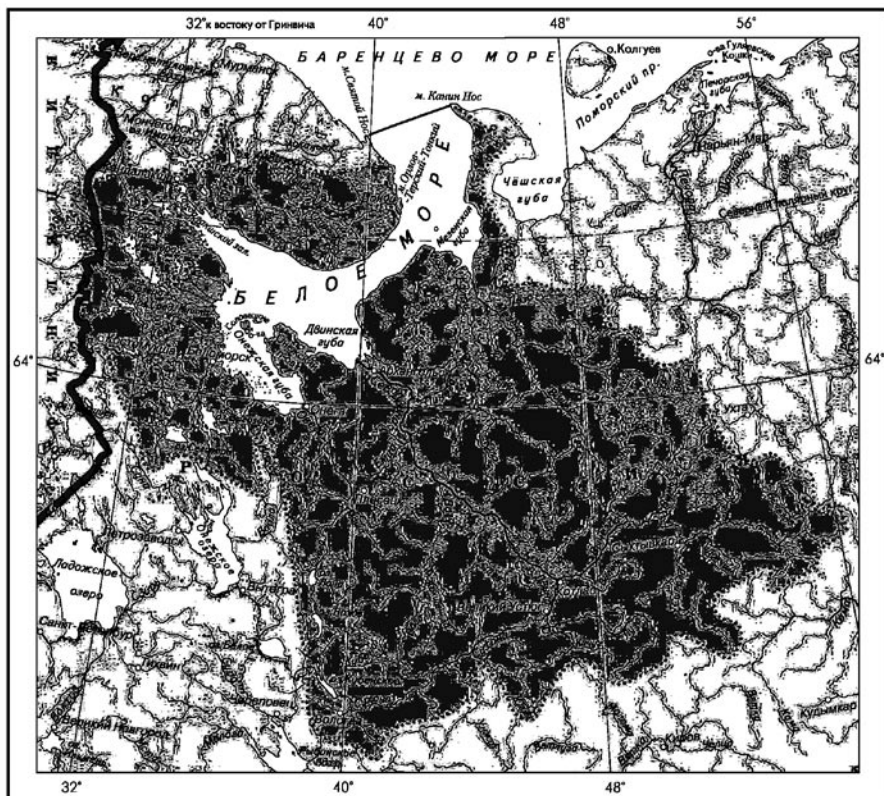


Рис. 2.16. Водосборный бассейн Белого моря
[Национальный атлас..., 2008].



Фото 2.10. Дельте Северной Двины, несмотря на высокие широты, также не удалось избежать антропогенного пресса.

натов, легкоокисляемых органических веществ, метанола, формальдегида, соединений алюминия и железа. В притоках Северной Двины (р. Пельшма) загрязнение вод лигносульфонатами в 1996–1997 гг. составляло 245–280 ПДК, а органическими веществами – 15–24 ПДК. В 60–70 % пунктов наблюдений на р. Сев. Двина в 24–33 % проб содержатся изомеры ГХЦГ в концентрациях 0,121–0,168 мкг/л. Воды притоков Северной Двины – рр. Сухоны, Вологды, Пельшмы, устойчиво относятся к категории «грязная» по причине высокого содержания фенолов, НУ, ТМ, аммонийного и нитритного азота, лигносульфонатов.

В итоге в 1990 г., например, Белое море с речным стоком получило 5100 т НУ, 51 т фенолов, 944 т детергентов, 830 кг ХОП. Со сточными водами побережья в это время в водоем поступило 51,5 т НУ, 1,3 т фенолов, 51 т детергентов.

Бассейны морей Арктики. Бассейн арктических морей составляют водосборы основных сибирских рек – Обь, Иртыш, Тобол, Енисей, Ниж. Тунгуска, Ангара (Карское море), Лена, Яна, Хатанга, Оленек (море Лаптевых), Индигирка, Колыма (Восточно-Сибирское море). При этом самый большой водосбор (2990 тыс. км²) имеет р. Обь, хотя по водности (402 км³/год) она занимает лишь третье место в бассейне после Енисея (597 км³/год) и Лены (530 км³/год).

Карское море. Большая часть акватории моря лежит на материковой отмели, поэтому оно относится к типу материковых окраинных морей. Его площадь равна 883 тыс. км², объем вод – 98 тыс. км³, средняя глубина – 111 м, наибольшая глубина – 596 м. На долю Карского моря приходится около 55 % (1290 км³ в год) общего стока всех морей Российского сектора Арктики (рис. 2.17). Река Обь ежегодно приносит в среднем 450 км³ воды, Енисей – около 600, Пясины – 80, Пур и Таз – около 86 и прочие реки – до 75 км³. Примерно 80 % речной воды приходит в море в конце лета – начале осени (июнь–сентябрь).

В бассейне **р. Обь** 80–85 % загрязнения речных вод составляют нефтепродукты (до 30 ПДК). Из-за аварий на нефтепромыслах Тюмени, а также огромного объема сточных вод городов побережья притоков Оби в Кузбассе, Томской, Кемеровской, Омской областях (рр. Томь, Чулым, Иртыш, Миас, Тура, Тагил и др.), иногда равных по величине их естественному стоку, эти притоки превратились в сточные коллекторы ЗВ. Даже среднегодовые концентрации нефтепродуктов, фенолов и тяжелых металлов в этих реках превышают предельно допустимые в десятки раз, а максимальные достигают сотен ПДК.

В итоге в середине 1990-х гг. среднегодовое содержание НУ в низовьях Оби (200–500 км от устья) составляло 12–20 ПДК, при максимумах (33–36 ПДК) у гг. Камень-на-Оби и Салехард. Аналогичные среднегодовые показатели были и по фенолам, при максимуме 30 ПДК в районе г. Салехард. В районе г. Барнаул содержание ртути в период 1988–1998 гг. иногда достигало 21–50 ПДК, а у г. Новосибирска в 1995-м отмечались критиче-

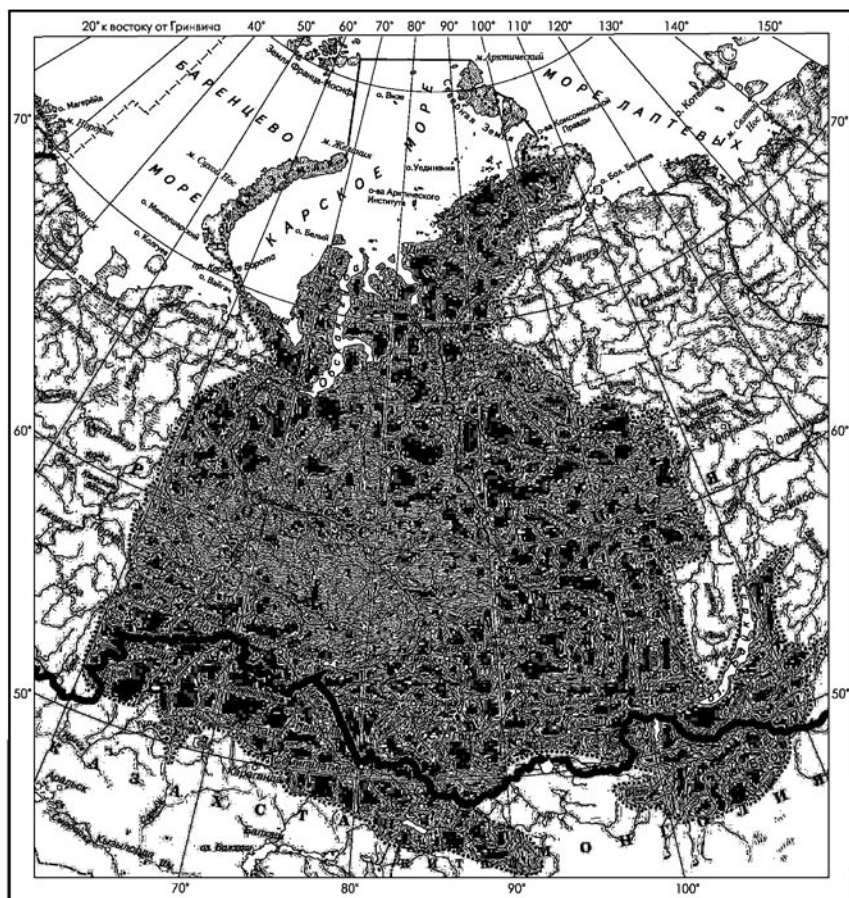


Рис. 2.17. *Водоосборный бассейн Карского моря
[Национальный атлас..., 2008].*

ские (до 3 ПДК) уровни загрязнения речных вод медью. Кроме того, в 1992–1996 гг. в 54–64 % пунктов наблюдения на Оби в 40 % проб воды присутствовали изомеры ГХЦГ с максимумом концентраций от 1,531 до 3,67 мкг/л.

В бассейне **р. Енисей** в 1997 г. в реки сбрасывалось 2854 млн. м³ сточных вод, загрязненных в основном НУ, фенолами, ТМ. На 96 % створов реки качество ее воды по этим показателям оценивалось как «грязная». При этом в верховьях отмечался высокий уровень загрязнения НУ, фенолами и Zn, в среднем течении – НУ, Cu и Zn, а в нижнем течении – НУ, фенолами, Cu, Zn, Fe, Mn, Al и лигносульфонатами (отходы предприятий г. Красноярск, Игарского и Дудинского портов, ряда деревообрабатывающих комбинатов побережья). При этом воды притоков Енисея: рр. Элегест, Бурей, Ус, Кантегир, Абакан загрязнены в основном соединениями меди; рр. Казыр, Уйбат, Малый и Большой Енисей – нефтепродуктами; рр. Тапа и Оя – фенолами. В

1992–1996 гг. в 44–47 % створов в 24 % проб присутствовали изомеры ГХЦГ в концентрациях до 0,147 мкг/л. Из трех водохранилищ на р. Ангара (Иркутское, Братское, Усть-Илимское) загрязнение фенолами Усть-Илимского самое высокое – 30–35 ПДК, а максимумы концентраций сульфидов и сероводорода здесь превышают 1000 ПДК. В водах Братского вдхр. содержание Mn может достигать 40 ПДК, а концентрации формальдегида и лигнина – до 0,159 и 23,9 мг/л.

Море Лаптевых. Относится к типу материковых окраинных морей. Его площадь – 662 тыс. км², объем вод – 353 тыс. км³, средняя глубина – 533 м, наибольшая глубина – 3534 м. В море Лаптевых впадает множество мелких и несколько крупных рек (рис. 2.18). Самая большая и наиболее полноводная река Лена ежегодно приносит в море около 530 км³ воды, река Хатанга – 105, река Яна – более 30, река Оленек – 40 и река Анабар – 25 км³ воды. Все прочие реки дают около 20 км³ воды в год. Общий объем

ежегодного стока в море равен примерно 720 км³, что составляет 30 % общего объема стока во все арктические моря. Однако распределение стока весьма неравномерно во времени и в пространстве. Около 90 % годового стока приходится на летние месяцы (июнь–сентябрь), из которых на август – около 35–40 % годового стока, тогда как в январе он едва достигает 5 %. Такой характер распределения стока в течение года объясняется тем, что реки, впадающие в море Лаптевых, имеют снеговое питание, причем подавляющая часть их вод поступает в юго-восточную часть моря

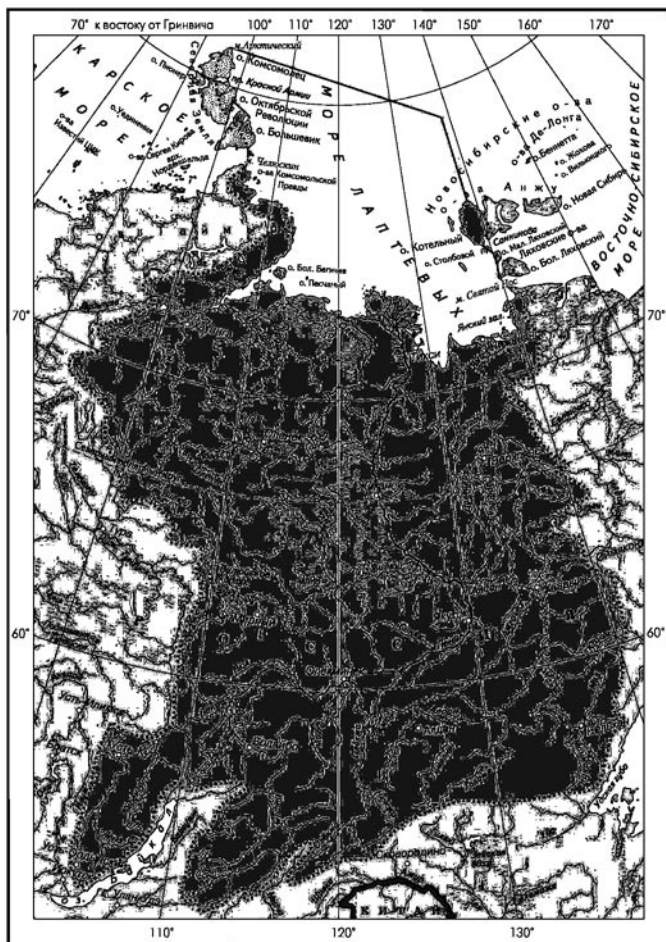


Рис. 2.18. Водосборный бассейн моря Лаптевых
[Национальный атлас..., 2008].

(одна Лена дает 70 % всего берегового стока). Большой материковый сток приводит к распреснению вод на обширных пространствах моря, особенно в южной и восточной его частях.

В бассейне **р. Лена** уровень антропогенной нагрузки на водные ресурсы очень высок. Его «обеспечивают» предприятия золото- и алмазодобывающей промышленности, разведочное бурение на нефть и др. (фото 2.11). Основными загрязнителями при этом оказываются фенолы и соединения Cu и Fe (до 10 ПДК в верхнем течении и 2–5 ПДК в нижнем). В половине пунктов наблюдений в 10 % случаев наблюдаются также изомеры ГХЦГ в концентрациях до 0,160 мкг/л.

Данные о загрязнении других рек бассейна моря Лаптевых практически отсутствуют.

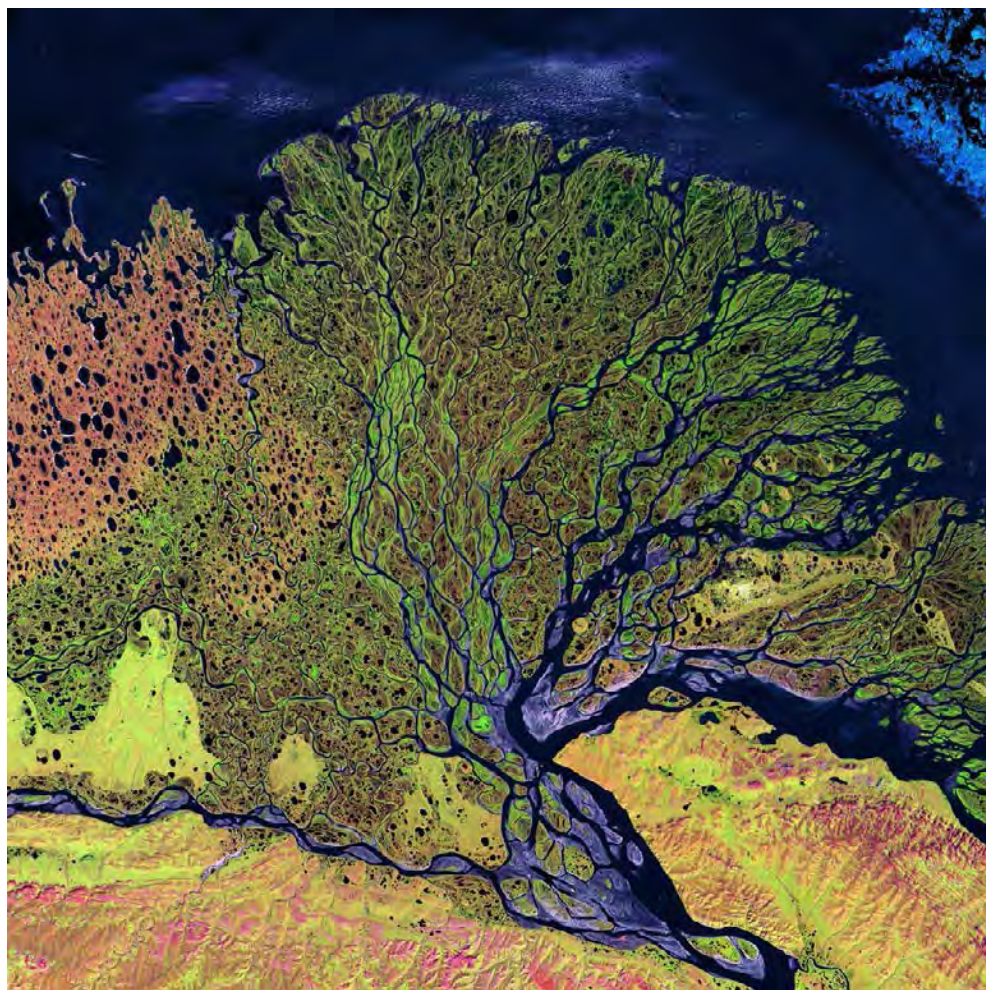


Фото 2.11. Дельта р. Лены – одна из красивейших дельт мира, «собирает» отходы золото- и алмазодобывающей промышленности.

Восточно-Сибирское море. Площадь моря составляет 913 тыс. км², объем вод – 49 тыс. км³, средняя глубина – 54 м, наибольшая глубина – 915 м, то есть это море целиком лежит на материковой отмели. Материковый сток в Восточно-Сибирском море сравнительно невелик – около 250 км³/год, что составляет всего 10 % общего объема речного стока всех арктических морей. Самая крупная из впадающих рек – Колыма, за год дает около 130 км³ воды, а вторая по величине река Индигирка – 60 км³/год. Все остальные реки за это же время вливают в море примерно 35 км³ воды.

Сведения о загрязнении рек бассейна Восточно-Сибирского моря (рис. 2.19) очень немногочисленны и не позволяют составить представление о суммарном количестве различных видов ЗВ, поступающих в настоящее время в их прибрежную зону с речным стоком.

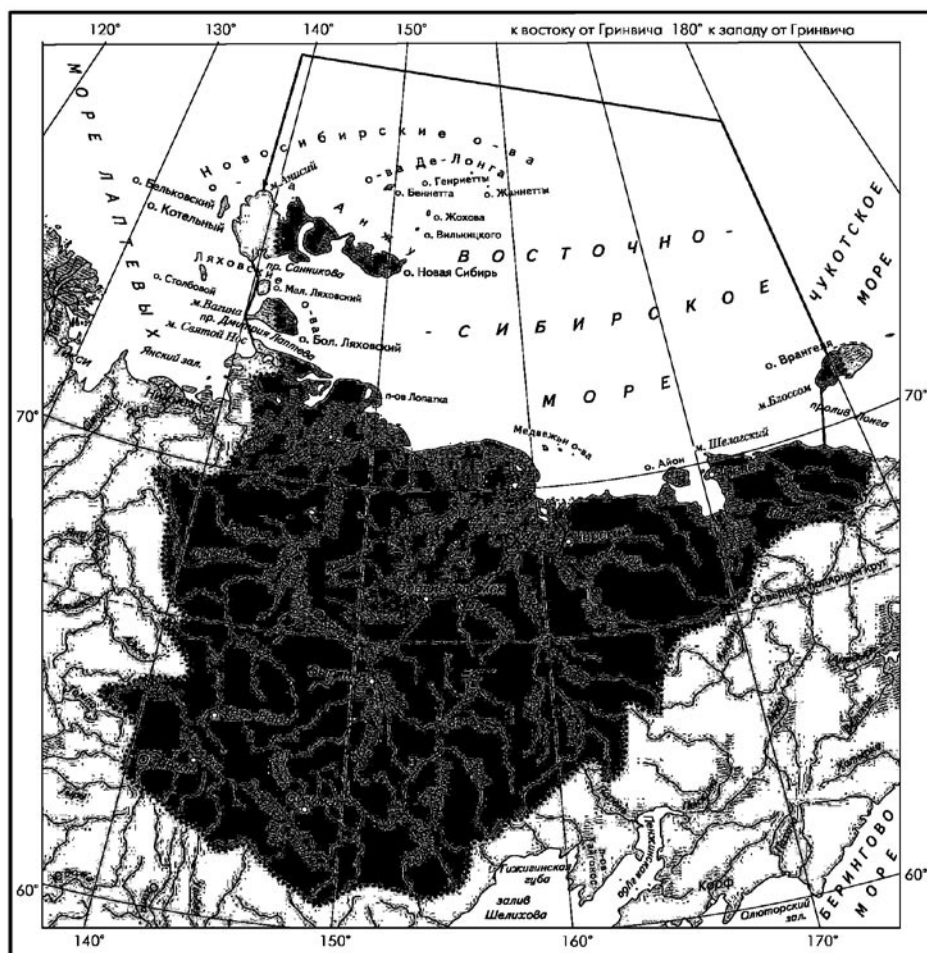


Рис. 2.19. Водосборный бассейн Восточно-Сибирского моря [Национальный атлас..., 2008].

Чукотское море. Площадь моря – 595 тыс. км², объем вод – 42 тыс. км³, средняя глубина – 71 м, наибольшая глубина – 1256 м. Материковый сток в Чукотское море весьма мал. Сюда поступает всего 72 км³ речной воды в год, что составляет около 5 % общего берегового стока во все арктические моря и доли процента от объема его вод. Из этого количества 54 км³ дают реки Аляски и только 18 км³ в год – реки Чукотки.

Сведения о загрязнении рек бассейна Чукотского моря (рис. 2.20) немногочисленны и не позволяют составить представление о суммарном количестве различных видов ЗВ, поступающих в настоящее время в их прибрежную зону с речным стоком.

Бассейны морей Дальнего Востока. Берингово море. Самое большое из дальневосточных морей, омывающих берега России. Его площадь равна 2315 тыс. км², объем вод – 3796 тыс. км³, средняя глубина – 1640 м, наибольшая глубина – 5500 м. Материковый сток в море равен примерно 400 км³ в год. Большая часть речной воды попадает в его самую северную часть, куда впадают наиболее крупные реки: Юкон (176 км³/год), Кускокуим (50 км³/год). Около 85 % суммарного годового стока приходится на летние месяцы.

Сведения о загрязнении рек бассейна Берингова моря (рис. 2.21)



Рис. 2.21. Водосборный бассейн Берингова моря [Национальный атлас..., 2008].

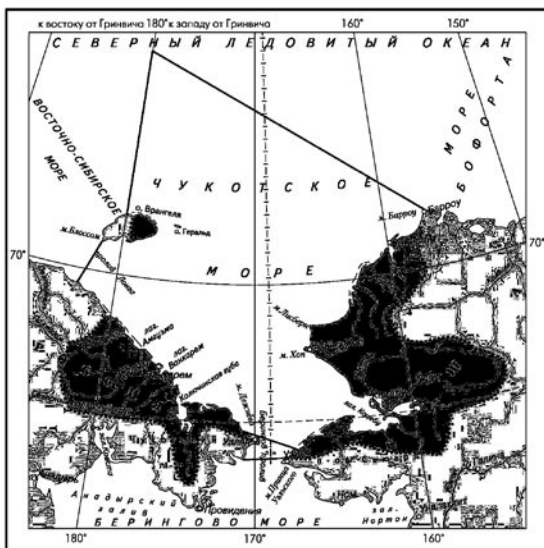


Рис. 2.20. Водосборный бассейн Чукотского моря [Национальный атлас..., 2008].

немногочисленны и не позволяют составить представление о суммарном количестве различных видов ЗВ, поступающих в настоящее время в их прибрежную зону с речным стоком.

Охотское море. Площадь зеркала морской поверхности составляет 1603 тыс. км², протяженность береговой линии – 10 460 км, а суммарный объем вод моря – 1316 тыс. км³. Средняя глубина моря составляет 821 м, а наибольшая – 3521 м (в Курильской котловине). В море впадает много, преимущественно небольших, рек, поэтому при значительном объеме его вод материковый сток относительно невелик. Суммарный сток всех рек водосбора Охотского моря – около 600 км³/год (рис. 2.22). Самая крупная река – Амур, на долю которой приходится около 65 % материкового стока в море. Другие сравнительно крупные реки – Пенжина, Охота, Уда, Большая (на Камчатке) приносят в море значительно меньше пресной воды. Сток поступает главным образом весной и в начале лета.

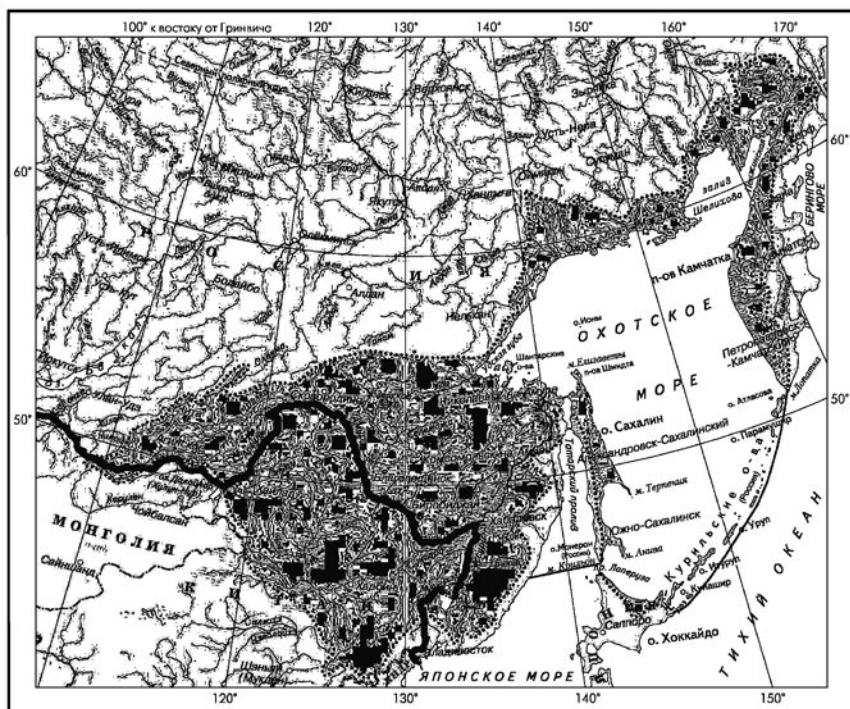


Рис. 2.22. Водосборный бассейн Охотского моря и его речная сеть [Национальный атлас..., 2008].

В бассейне **р. Амур** диапазон колебаний значений коэффициента АНВР водосбора Охотского моря составляет от 1,64 до 210,52 тыс. чел. на км³ стока. Максимальная величина показателя – более 210 тыс. чел./ км³ – в Забайкальском крае. В Приморском крае, занимающем второе место на водосборе по уровню антропогенной нагрузки на водные ресурсы, на 1 км³ пресной воды приходится в пять раз меньше людей – около 47 тыс. человек. В Еврейской автономной области – чуть больше 27 тыс. чел., в Амурской и Сахалинской областях – по 10–15 тыс., а в Хабаровском крае и в Магаданской области – менее 10 тыс. чел./км³.

Сравнивая полученные величины с аналогичными, рассчитанными для водосборных бассейнов других морей России, очевидно, что по максимальным значениям этот показатель почти в 20 раз ниже, чем на водосборе Каспийского моря (3,87 млн. чел./км³ – Астраханская обл.), почти в 40 раз меньше, чем на водосборах Днестра, Южного Буга и Днепра (7,5 млн. чел./км³ – Одесская, Николаевская, Днепропетровская, Запорожская обл.) и в 100 раз меньше, чем на водосборе Дуная (20 млн. чел./км³ – Румыния).

Величина коэффициента АНВР для Приморского края – второго по этому показателю на водосборе Охотского моря, а также остальных его районов входит в диапазон значений, характерных для водосборов рек Северного Кавказа, Грузии (10–100 тыс. чел./км³) и лесной зоны севера европейской части России.

Основные источники загрязнения речных вод на водосборе Охотского моря расположены на территориях Читинской, Амурской областей и Хабаровского края (табл. 2.8). За период 1992–2005 гг. вод первого класса качества – «условно чистые» в бассейне не отмечено. С 1992–1996 гг. к 2005 г. на 46 % наблюдательных пунктов (створов) водосбора отмечались воды четвертого класса качества – «грязные».

Таблица 2.8.

**Массы загрязняющих веществ (т/год), поступающих
в поверхностные водные объекты Амурского бассейна
со сточными водами**

Субъекты Российской Федерации	НУ	Ф	СПАВ	Fe	Cu	Zn
Читинская область	0,13	0,91	13,5	37,8	2,13	3,7
Амурская область	0,06	1,4	5,4	141,2	0,74	1,1
Еврейская АО	0,01	0,03	2,65	10,5	0,05	0,21
Хабаровский край	0,13	1,2	50,2	125,5	0,46	4,2
Приморский край	0,03	0,16	4,9	27,3	0,15	2,1
Всего	0,36	3,7	76,65	342,3	3,53	11,31

Концентрация фенолов изменяется по рекам бассейна от 0,002 до 0,042 мг/л (табл. 2.9).

Максимальные их величины отмечаются в конце зимней межени, наименьшие – во время весеннего половодья, в период паводков содержание фенолов может повышаться. Наблюдается общая тенденция увеличения концентрации фенолов от истока к устью.

Наибольший вклад в загрязнение рек Амурского бассейна вносят органические вещества. Вынос органических веществ водами Амура у с. Богородское составляет $5,3 \cdot 10^6$ т/год, площадьная

Таблица 2.9.

Концентрации (мг/л) загрязняющих веществ на различных участках рр. Амур и Зея по данным Дальгидромета

Водный объект	Год	НУ	Ф	СПАВ	Fe	Cu	Zn	Pb	ИЗВ
р. Амур, г. Благовещенск, 5 км ниже впадения	1996	0,04	0,002	0,03	0,95	0,01	0,028	0,041	4,18
	1997	0,01	0,005	0,04	1,2	0,002	0,035	0,052	3,96
р. Амур, г. Хабаровск, 14 км ниже города	1996	0,03	0,005	–	0,98	0,008	0,006	0,024	4,89
	1997	0,01	0,004	–	1,18	0,001	0,034	0,058	3,79
Амур, г. Амурск, 5 км ниже сброса сточных вод ЦКК и других предпри- ятий	1996	0,05	0,004	–	1,44	0,01	0,034	0,023	5,86
	1997	0,02	0,005	–	1,32	0,007	0,028	0,064	4,84
р. Амур, г. Комсомольск, 5 км ниже города	1996	0,05	0,003	–	0,86	0,01	0,022	0,022	3,97
	1997	0,01	0,008	–	1,32	0,008	0,062	0,002	5,65
р. Амур, с. Богородское, в створе гидропоста	1996	0,01	0,022	–	0,62	0,007	0,002	–	7
	1997	0,02	0,006	–	1,43	0,034	0,143	–	11,7
р. Амур, г. Николаевск, 7 км ниже города	1996	0,09	0,004	0,05	0,54	0,003	0,013	–	2,55
	1997	0,02	0,007	0,02	1,15	0,001	0,009	–	3,82
р. Зея, г. Благовещенск, в черте города	1996	0,04	0,003	0,04	0,96	0,004	0,015	0,03	3,19
	1997	0,02	0,005	0,03	0,97	0,002	0,017	0,043	3,2
р. Зея, 1 км ниже г. Зея	1996	–	0,004	–	0,39	–	–	–	1,85
	1997	–	–	–	0,36	–	–	–	1,14
р. Зея, г. Свободный, 1 км ниже города	1996	0,04	0,006	0,09	0,58	0,011	0,101	–	5,6
	1997	0,02	0,007	0,02	0,45	0,005	0,007	–	3,06

величина выноса органики располагается в основном в интервале 4–9 т/км². Особенную опасность представляют сточные воды нефтеперерабатывающих заводов (города Хабаровск, Комсомольск), поступающие в Амур. В зимнюю межень и ранней весной в речной воде в зоне заводов наблюдаются повышенные концентрации нефтепродуктов, превышающие ПДК в 2–5 раз.

Для сточных вод лесохимической и деревообрабатывающей промышленности характерно наличие метанола (до 7 ПДК), лигнина (446 ПДК), фенольных соединений (8–10 ПДК). В районах сосредоточения предприятий горнодобывающей промышленности и цветной металлургии в речных водах отмечается повышенное содержание металлов (меди, цинка, хрома, никеля, свинца). Серьезным источником загрязнения поверхностных вод являются хозяйственно-бытовые сточные воды урбанизированных территорий, которые содержат в своем составе специфические загрязнители: шлаки, растворы солей, кислот, щелочей, а также биологические загрязнители – бактерии, возбудители инфекций.

Оценка качества воды Амура по индексу загрязненности вод показывает, что на участке Верхнего Амура до г. Благовещенска вода соответствует III классу («умеренно загрязненная»). Основными загрязняющими веществами являются СПАВ – 2,7 ПДК, фенолы – 3–4,9 ПДК, железо – до 12 ПДК, марганец – до 6 ПДК, медь – до 14 ПДК.

На участке от г. Благовещенска до г. Амурска качество воды в целом соответствует IV классу («загрязненная»), основные загрязняющие компоненты: фенолы – до 15 ПДК, нефтепродукты, железо, медь, цинк, свинец (2–20 ПДК). Наибольшие значения концентраций отмечаются в створах ниже городов Благовещенска, Хабаровска.

На участке г. Амурск – г. Комсомольск качество воды соответствует V классу («грязная»); в реке отмечается повышенное содержание фенолов – 5 ПДК, железа – 13 ПДК, меди – 7 ПДК, цинка – 3 ПДК, свинца – 2 ПДК, метанола – до 5 ПДК.

На участке г. Комсомольск-на-Амуре – с. Богородское вода относится к VII классу качества («чрезвычайно грязная»). Основные загрязняющие вещества: медь – 34–180 ПДК, цинк – 14–81 ПДК, железо – 1427 ПДК, фенолы – 6–12 ПДК.

На участке с. Богородское – г. Николаевск-на-Амуре вода соответствует IV классу («загрязненная»).

Качество воды основных притоков Амура характеризуется следующими показателями:

- р. Зея – вода IV класса качества («загрязненная»), основные загрязняющие компоненты: фенолы – до 7 ПДК, железо – до 12 ПДК, цинк – 3,5 ПДК, медь – 2 ПДК, свинец – 1,7 ПДК;
- р. Буряя – вода IV класса качества («загрязненная»), основные загрязнители те же, что на р. Зее;
- р. Уссури – вода III класса («умеренно загрязненная»), основные загрязняющие вещества: нефтепродукты, фенолы, медь.

Таким образом, в бассейне Амура представлен практически весь диапазон классов качества воды – от категории «чистой» (например, р. Маньчжурка в бассейне верхнего Амура) до «чрезвычайно грязной» (р. Березовая, г. Хабаровск).

Самыми загрязненными на водосборе оказываются воды рек Сахалина (р. Охинка). В 1998 г. среднее содержание нефтепродуктов здесь, как и в предыдущие десять лет, достигало 523 ПДК при максимуме 2340 ПДК. Воды Амура, взморье которого принадлежит и Охотскому, и Японскому морям (Татарский пролив), загрязнены аммонийным азотом, Cu, Fe, Mn, фенолами, метанолом до уровня «грязная», при котором концентрации токсикантов выше ПДК в несколько десятков раз. В 72-75 % пунктов наблюдений на р. Амур в половине проб обнаруживают изомеры ГХЦГ в концентрациях до 1,31 мкг/л.

Японское море. Относится к наиболее крупным и глубоким морям Мирового океана. Его площадь равна 1062 км², объем – 1631 тыс. км³, наибольшая глубина – 3720 м. Отличительная особенность Японского моря – сравнительно небольшое число впадающих в него рек (рис. 2.23). Почти все реки горные. Материковый сток в Японское море, равный примерно 210 км³ в год, довольно равномерно распределен в течение года.

Загрязняющие вещества (нефтяные углеводороды, хлорорганические пестициды, тяжелые металлы) привносятся в открытую часть моря из прибрежных районов водным транспортом и из атмосферы. Источники поступления загрязняющих веществ в залив Петра Великого с берега – промышленные и коммунальные предприятия, а также морской транспорт и рыболовный флот. Значительная роль в загрязнении вод залива принадлежит двум крупнейшим городам-портам – Владивостоку и Находке. Наибольшая нагрузка приходится на бухту Золотой Рог, Амурский и Уссурийский заливы. Существенный вклад в загрязнение прибрежной зоны залива Петра Великого вносят реки Раздольная, Артемовка, Партизанская, со стоком которых в морские воды попадает основное количество взвешенных веществ и пестицидов. Татарский пролив загрязняется сточными водами городов, промышленных предприятий и сельскохозяйственных комплексов, расположенных на западном побережье острова Сахалин (район города Александровск-Сахалинский) и на территории материка (Хабаровский край).

Бухта Рудная в Японском море и водосбор р. Рудная расположены в одном из наиболее развитых промышленных регионов Приморского края – Дальнегорском рудном районе. Предприятия горнодобывающей и горно-химической промышленности, возникшие здесь на базе богатейших рудных месторождений тяжелых металлов, являются мощными устойчивыми источниками этих элементов в речные воды, а вместе с ними – и в прибрежные морские акватории. Концентрации взвешенных тяжелых металлов в поверхностных речных водах водосбора р. Рудной в зонах горнодобывающих и перерабатывающих предприятий могут достигать 200–300 мг/л (рис. 2.24).

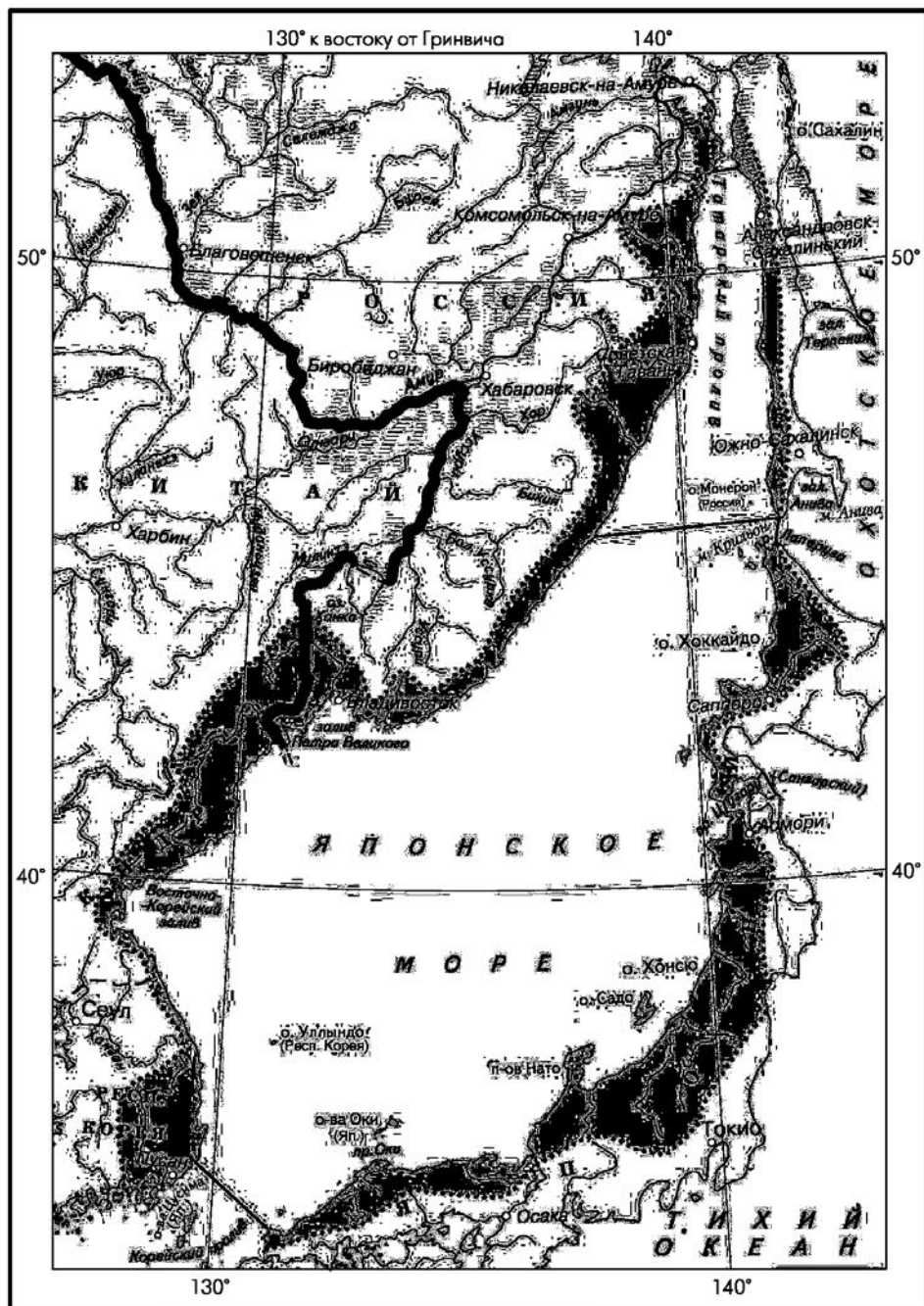


Рис. 2.23. Водосборный бассейн Японского моря
[Национальный атлас..., 2008].

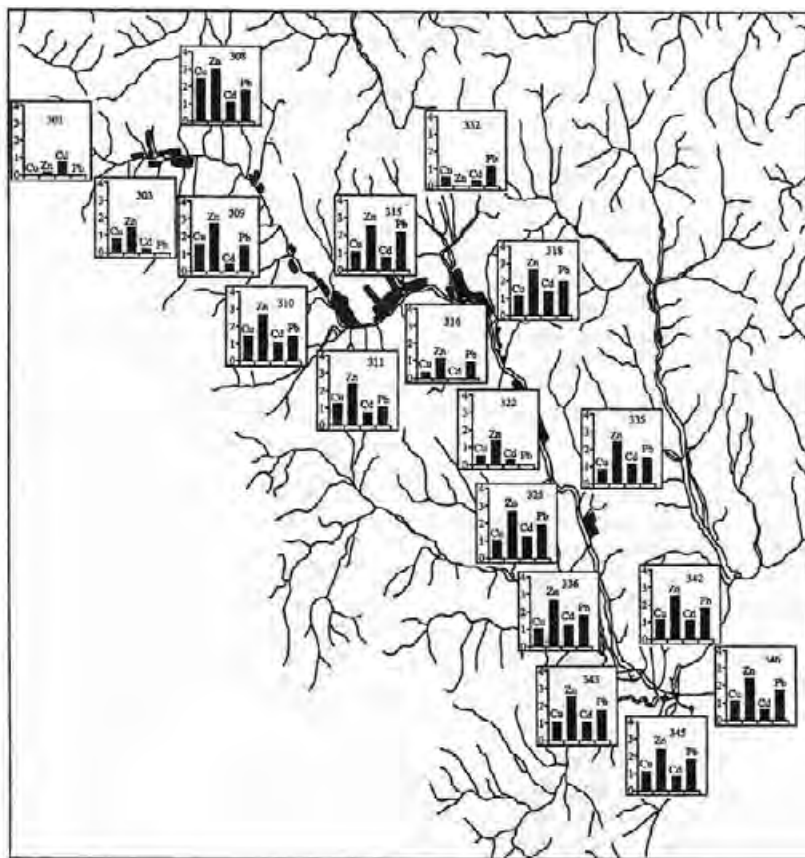


Рис. 2.24. Содержание ($\text{мг/л} \times 100$) взвешенных Zn, Cd, Pb, Cu в поверхностных водах р. Рудной в Приморском крае [Kachur, Tkalin, 2000].

Доля техногенной составляющей взвесей в ее стоке превышает 70–90 %, а общее количество цинка, свинца и меди, выносимое рекой в море за год, составляет соответственно 82, 19 и около 4 тонн (табл. 2.10).

2.6. Показатели качества природных вод

Состояние природных вод оценивается по физико-химическим и биологическим (микро- и гидробиологическим) показателям. Состав показателей для оценки качества водной среды выбирается с учетом местных условий по действующим правилам, а также в соответствии с поставленными задачами исследований или предполагаемым характером ее использования. Для характеристики состояния и качества природных вод с помощью стандартных методов анализа природных вод определяются несколько групп показателей.

Таблица 2.10.

**Структура ионного состава стока р. Рудная (т/год) в
Приморском крае [Христофорова, 1989]**

Элементы	Суммарный ионный сток	Природный ионный сток	Техногенная составляющая ионного стока	Доля техногенной составляющей в суммарном ионном стоке, %
Zn	88,5	6,7	81,8	92,4
Pb	21,3	2,2	19,1	89,7
Cu	5,1	1,3	3,8	74,5

I группа. Общепринятые санитарные и органолептические показатели:

1. *Светопропускание, или прозрачность*, воды зависит от цвета и мутности воды. Мерой является высота водяного столба, сквозь которую еще можно наблюдать белый диск Секки. Размерность – в см или в м.

2. *Цветность* воды (Цв) определяют в естественных условиях путем сравнения исследуемой воды со стандартной Pt-Co шкалой цветности природных вод. Размерность Цв – град. Pt-Co шкалы.

3. *Общее содержание примесей* – сумма растворенных и взвешенных в воде веществ, определяемых выпариванием нефилтрованной пробы воды, высушиванием осадка при 105° С до постоянной массы и последующим взвешиванием.

4. *Растворенные вещества* определяются выпариванием профильтрованной пробы воды, высушиванием осадка при 105° С до постоянной массы и последующим взвешиванием.

5. *Взвешенные вещества* остаются на фильтре при фильтровании пробы воды. Определяются непосредственно после фильтрования пробы высушиванием осадка при 105° С до постоянной массы и взвешиванием либо косвенно по разности между общим содержанием примесей и количеством растворенных веществ.

6. *pH* определяется колориметрическим или электрометрическим способами.

7. *Растворенный в воде кислород (O₂)* определяется йодометрическим методом, основанным на реакции растворенного кислорода с гидроокисью марганца. Применяются также электрометрический и полярографический методы определения концентрации растворенного кислорода. Содержание кислорода выражается в мг O₂/л.

8. *Перманганатная окисляемость (ПО)* определяется методом Кубеля, основанным на окислении присутствующих в пробе воды органических веществ (обычно лабильных) перманганатом.

натом калия в сернокислой среде при кипячении испытываемой пробы воды. Метод применяется для проб с окисляемостью $<100 \text{ мг O}_2/\text{л}$.

9. *Бихроматная окисляемость* (БО) определяется методом окисления бихроматом присутствующих в испытываемой пробе воды органических веществ (и минеральных восстановленных соединений) при кипячении в присутствии серной кислоты (составляет 50 % общей смеси). Окисляемость рассчитывается в миллиграммах O_2 , эквивалентного расходу окислителя на 1 л воды.

10. *Биохимическое потребление кислорода* (БПК) определяют стандартным методом (с разбавлением пробы или без такого) по разности между исходным содержанием кислорода в пробе воды и после ее инкубации при стандартных условиях (в течение 1, 3, 5, 7 или 20 сут. при $+20^\circ \text{C}$ без доступа воздуха и света).

11. *Содержание аммонийного N* (N-NH_4) определяется колориметрическим методом добавлением в пробу воды реактива Несслера либо другими методами. Содержание выражают в мг N/л .

12. *Содержание нитритного N* (N-NO_2) определяют колориметрически с добавлением сульфаниловой кислоты и *n*-нафтиламина. Содержание выражают в мг N/л .

13. *Содержание нитратного N* (N-NO_3) определяют колориметрически с добавлением фенолдисульфоновой кислоты, в результате чего образуется соединение желтой окраски. Другой применяемый метод основан на применении салицилата натрия, или метод восстановления нитратов до нитритов металлическим кадмием. Содержание выражают в мг N/л .

14. *Содержание растворимых ортофосфатов (фосфатов)* (P-PO_4) определяют колориметрически с добавлением в пробу воды молибдата и соли сурьмы, а образующееся комплексное соединение восстанавливают аскорбиновой кислотой. Содержание выражают в мг P/л .

15. *Концентрация Fe* – определяется общее содержание Fe ($\text{Fe}_{\text{общ}}$) колориметрическими методами с использованием роданида калия и ортофенантролина.

II группа. Микробиологические показатели:

1. *Общее количество сапрофитных бактерий* определяется при температуре выращивания $+37^\circ \text{C}$ (ГОСТ 18963-73), тест характеризует прямое потребление бактериями имеющихся в воде органических веществ.

2. *Колититр или колииндекс* – индикаторы фекального загрязнения испытываемой воды, характеризуют численность выращенных бактерий группы кишечных палочек. Колититр характеризует наименьший объем в миллилитрах, в котором обнаруживается одна колония бактерий. Колииндекс – обратное значение колититра.

3. *Энтерококки* – косвенная характеристика вероятности отсутствия или наличия в воде патогенных микробов, прямое определение которых представляет значительные сложности.

III группа. Гидробиологические показатели – характеризуют сапробность водоема и указывают на степень загрязнения водной среды органическими веществами, а также на наличие токсических веществ, влияющих на водные организмы. Выделяют водоемы **олигосапробные** (наименее загрязненные), **мезосапробные** (средние по загрязнению) и **полисапробные** (наиболее загрязненные). В **олигосапробных** водах количество растворенного O_2 близко к нормальному насыщению, растворенных органических веществ практически нет, отсутствует сероводород и невелико содержание CO_2 . В **мезосапробных** водоемах имеются разные признаки загрязнения водной среды, в небольших количествах присутствуют сероводород и CO_2 , в заметных количествах есть O_2 , присутствуют слабоокисленные соединения N (аммоний, amino- и амидокислоты). Мезосапробные воды (зоны водоемов) подразделяются на α и β **мезосапробные**. В первых встречаются аммоний, amino- и амидокислоты, присутствует и O_2 .

Минерализация органического вещества происходит при аэробном его (преимущественно бактериальном) окислении. В α мезосапробных водах присутствуют аммоний и продукты его окисления, аминокислот нет, в незначительных количествах присутствует сероводород, растворенного O_2 в воде много, и минерализация органического вещества идет до полного его окисления. Для α и β мезосапробных вод характерны специфичный видовой состав микрофлоры, характерная ее численность и биомасса.

В **полисапробных** водоемах растворенный O_2 почти полностью отсутствует, в воде много неразложившихся белков, в значительных количествах присутствуют сероводород и CO_2 и в целом доминируют восстановительные условия. Критерием сапробности служат видовой состав, количество и структура сообщества сапробионтов (индикаторы качества воды). Обычно гидробиологические показатели включают содержание хлорофилла «а», сестона, тесты на токсичность среды, в них приводится список сапробных индикаторных организмов, характеризующих степень загрязнения водоема.

Физико-химические показатели состояния поверхностных вод включают: расход воды, скорость течения воды, уровень воды, температуру воды, цветность воды, прозрачность воды, запах, pH, жесткость, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), удельную электропроводность, общую минерализацию воды, содержание кислорода, диоксида углерода, взвешенных веществ, хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, кальция, магния, натрия, калия, аммонийного N, нитритного N, нитратного N, минерального P, общего Fe ($Fe_{общ}$), кремния, нефтепродуктов, СПАВ, фенолов, пестицидов, тяжелых металлов, загрязняющих веществ, а также показатели БПК₅ и ХПК. Оценка этих показателей производится по уточненным методикам анализа природных вод. Периодичность выполнения наблюдений и

программы исследовательских работ устанавливались в соответствии с категорией пунктов наблюдений.

На реках и водохранилищах нашей страны гидрохимические и гидробиологические наблюдения по обязательным программам выполнялись семь раз в год: во время половодья (на его подъеме, пике и спаде), в летнюю межень (при наименьшем расходе воды и при прохождении дождевого паводка), осенью перед ледоставом и в зимнюю межень. На отдельных водотоках периодичность наблюдений по обязательным программам принималась в зависимости от водного режима и поэтому менялась от трех-четырех до одиннадцати в год.

2.7. Количественные критерии качества природных вод

В конце 1990-х гг. наблюдения за качеством поверхностных вод суши проводились на 2200 створах в 1600 наблюдательных пунктах (рис. 2.25). В год отбиралось около 22000 проб воды и 100 проб донных отложений. В 87 лабораториях страны выполнялось более 650000 определений 120 показателей загрязнения в воде и около 500 определений семи видов пестицидов в осадках. Количество показателей, определяемых в отдельных подразделениях гидрометеорологической службы, колеблется от 25 до 80.



Рис. 2.25. Государственная сеть наблюдений Росгидромета за состоянием водных объектов [Национальный атлас..., 2008].

1. Для количественной оценки качества природных вод **по гидрохимическим** показателям используют условный индекс загрязненности вод (ИЗВ), позволяющий сравнить наблюдаемые концентрации ЗВ с установленными их предельно допустимыми величинами (ПДК) по разным компонентам загрязнения (НП, фенолы, детергенты, ХОП). В последние годы индексация степени загрязненности поверхностных природных вод производится по величине *удельного комплексного индекса загрязненности воды (УКИЗВ)*, учитывающей аналогичное соотношение, но у большего количества показателей. В пяти классах качества вод величина этого показателя изменяется от 1 до 16, а сами классы включают градации: **первый класс** – условно чистая; **второй класс** – слабозагрязненная; **третий класс** – весьма загрязненная (разряд «а»), очень загрязненная (разряд «б»); **четвертый класс** – грязная (разряд «а»), грязная (разряд «б»), очень грязная (разряд «в»), очень грязная (разряд «г»); **пятый класс** – чрезвычайно грязная.

2. В соответствии с Методическими указаниями по выделению зон экологического бедствия, разработанными в ИГ РАН, при «критической» экологической ситуации содержание в воде нефтепродуктов, СПАВ, фенолов, ртути и меди превышает 10 ПДК, в случае «кризисной» – 2 ПДК, а при «относительно удовлетворительной» ситуации содержание этих видов токсикантов в морской воде должно быть менее 1 ПДК. Для пестицидов аналогичные градации составляют соответственно: более 10 мкг/л, 1–10 мкг/л и 10^{-2} – 10^{-3} мкг/л.

3. Одним из **микробиологических** критериев санитарно-эпидемиологического состояния вод является *индекс лактозоположительной кишечной палочки (ЛКП)* – количество палочек в 1 л воды. В соответствии с Методическими указаниями по выделению зон экологического бедствия на основании утвержденных гигиенических классификаций экологическую ситуацию в водном объекте можно считать «катастрофической» при величине этого показателя более 10^6 , «кризисной» – при его значениях от 10^5 до 10^6 , а «относительно удовлетворительной» – при величинах ЛКП менее 10^3 .

4. Другими критериями состояния водоемов по микробиологическим показателям являются: *общее количество бактерий, количество гетеротрофных сапрофитных бактерий (ГСБ) и отношение общего количества этих микроорганизмов к количеству (ГСБ)*. В соответствии с рекомендациями международного симпозиума «Экологические модификации и критерии экологического нормирования» (1990 г.) для «катастрофической» ситуации величина первого показателя должна составлять более 10000 кл/мл, второго – более 100000 кл/мл, а третьего – менее 10^2 ; для «кризисной» ситуации эти показатели составляют соответственно 5000–10000 кл/мл, 50000–100000 кл/мл и менее 10^2 ; а для «относительно удовлетворительной» – менее 1000 кл/мл, менее 5000 кл/мл и более 10^3 .

5. Для количественной оценки **гидробиологического** состояния вод используют различные индексы (Пантле–Букка, Зелинки–Марвана и др.). Индекс *сапробности* J водной среды, предложенный в 1955 г. Р. Пантли и Г. Букком, вычисляется по формуле:

$$J = \sum nk / \sum n,$$

где n – относительное или абсолютное обилие видов-индикаторов сапробности водной среды, k – индексы сапробности этих видов. Индикаторную значимость олигосапробов, α - и β -мезосапробов и полисапробов, следуя индексу J , надо принимать соответственно за 1, 2, 3 и 4. При этом количественная представленность указанных организмов обозначалась соответственно за 1 (случайные определения), 3 (частая встречаемость) и 5 (массовое развитие).

В полисапробной зоне индекс сапробности равен 4–3,5, в α - и β -мезосапробной – 3,5–2,5 и 2,5–1,5, в олигосапробной – 1,5–1. Индексы сапробности, вычисленные по Пантле–Букку, тесно коррелируют со значениями БПК и суточной продукцией водорослей.

2.8. Реакция прибрежных морских экосистем на трансформацию речных водных ресурсов (на примере Черного моря)

Представленные последствия антропогенной нагрузки на речные водные ресурсы, безусловно, отражаются на условиях среды внутренних и окраинных морей. При этом ответная реакция моря на деятельность человека на водосборе в отличие от речных гидросистем проявляется в первую очередь не в изменении объемов вод, а в их качественных преобразованиях. Такая кажущаяся простота реакции вод прибрежной зоны морей на антропогенные импульсы с водосбора компенсируется многофакторностью и динамичностью процессов, определяющих в море дальнейшую судьбу воздействий человека.

Многообразие и высокая динамика природообразующих факторов в море вызывают высокую пространственно-временную изменчивость, опосредованность и неоднозначность его ответной реакции на внешние воздействия. Кроме того, наличие третьей ординаты (глубины) в условиях водной среды определяет существенные различия по вертикали в характере и интенсивности одних и тех же внешних воздействий и реакции на них абиотических и биотических компонент морской экосистемы. Все эти обстоятельства существенно затрудняют морской гидроэкологический мониторинг.

Успешность решения региональных и глобальных гидроэкологических проблем, возникающих при исследованиях современного состояния морских и речных водных ресурсов в условиях хозяйственной деятельности, зависит в значительной мере от сте-

пени и качества увязки результатов исследований в первую очередь гидрологов суши и океанологов. Только такой подход позволит выявить механизмы взаимодействия водных ресурсов суши и моря как единой гидрогеоэкологической системы, разработать методики прогноза развития морских гидроэкологических ситуаций в зависимости от состояния вод суши и наоборот.

После проведенного анализа антропогенной трансформации речных водных ресурсов можно схематично районировать побережье Мирового океана, а также внутренних и окраинных морей по характеру ожидаемой реакции морских водных ресурсов на такие изменения. Типичными признаками таких реакций обычно оказываются: изменение гидрологической структуры прибрежных вод; изменения их качества; совместные структурные и качественные преобразования морских водных ресурсов.

Следуя такой классификации, можно ожидать, что в приустьевых районах Балтийского, Баренцева, Белого морей, российских морей Арктики, Берингова и Охотского морей антропогенная нагрузка на водные ресурсы их водосборов (в основном загрязнение речных вод) проявится, вероятнее всего, в изменении качественного состава морских прибрежных вод.

В приустьевых же зонах Черного, Азовского и Каспийского морей характер антропогенной нагрузки на речной сток (зарегулирование, безвозвратное изъятие и загрязнение) таков, что ее последствия для морской экосистемы проявятся в более сложном виде. Прежде всего следует ожидать изменений гидрологического режима и структуры шельфовых вод, влекущих за собой трансформацию их гидрохимического режима. Параллельно с этими процессами будет ухудшаться и качество морских вод и донных осадков.

Факты, полученные в ходе гидроэкологических исследований шельфов окраинных и внутренних морей России и сопредельных государств, проведенных в конце XX – начале XXI века разными ведомствами, показывают справедливость этих прогнозов. В качестве примера представим реакции прибрежных экосистем Черного моря на трансформацию водных ресурсов его водосборного бассейна.

2.8.1. Гидрологическая структура вод

Для прибрежных вод Черного моря речной сток имеет определяющее значение. До середины 50-х гг. антропогенное его изъятие практически не сказывалось на состоянии черноморской экосистемы. Начиная же с этого периода, безвозвратное потребление воды на нужды народного хозяйства стало возрастать на $0,74 \text{ км}^3$ ежегодно и к 1986 г. достигло $30 \text{ км}^3/\text{год}$. Из них $1/3$ приходится на воды Дуная и 50 % – на воды Днепра. Размах колебаний величины отъема стока до 1950 г. не превышал 5, а в настоящее время он составляет $14 \text{ км}^3/\text{год}$. Колебания же общего стока по причине естественного изменения водности рек с 1960 по 1980 г.

составляли 75–80 % его средней ($340,6 \text{ км}^3/\text{год}$) величины.

Период роста антропогенного отъема речного стока совпадает с этапом увеличения водности лет (1946–1986 гг.), когда природный сток в Черное море ежегодно возрастал на $2,9 \text{ км}^3$. Таким образом, скорость естественного увеличения притока пресных вод в Черное море в четыре раза превышает его антропогенное сокращение, величина которого (15 % суммарного) оказывается полностью компенсированной природными факторами.

В то же время в результате зарегулирования речного стока его поступление в Черное море летом за последние 30 лет уменьшилось в 2,5 раза. После строительства многочисленных плотин прежде всего был «срезан» весенний паводок, который выносил в море до 70 % стока за несколько недель и огромные количества взвешенного материала.

Исходя из представленных особенностей климатических изменений речного стока и антропогенной нагрузки на водные ресурсы водосборного бассейна Черного моря, следовало ожидать комплексной реакции на нее условий среды этого водоема. То есть она должна была проявиться как в трансформации структуры вод шельфа, так и в качественных их преобразованиях. Действительно, в северо-западной части Черного моря в конце XX века отмечены такие изменения.

1. Со второй половины 60-х гг. в данном районе летом наблюдается устойчивое распреснение поверхностного (над сезонным термоклином) слоя вод. Отрицательный тренд солености достигает $0,3 \text{ ‰}$ в год.

2. Параллельно с этим в придонном слое зафиксирован рост солености. В зоне взморья Дуная за 23 года она увеличилась на $1,06 \text{ ‰}$. На промежуточных горизонтах 10–20 м в открытых районах СЗЧМ положительный тренд солености за 20 лет составил $0,79 \text{ ‰}$. С 1967 г. рост солености в придонном слое стабилизировался, а на промежуточных горизонтах она продолжает нарастать – увеличивается толщина слоя соленой придонной воды.

3. На мелководных участках шельфа за последние 25 лет объем вод соленостью $18,3\text{--}18,9 \text{ ‰}$ возрос на 10 %, а объем вышележащих вод более низкой солености ($17,3\text{--}18,2 \text{ ‰}$) пропорционально сократился.

4. В слое 0–30 м за указанный период времени выявлен положительный тренд вертикального градиента солености. Ее контрасты между поверхностным и придонным слоями до 1982 г. по усредненным и фактическим данным возросли на 1–1,8 и 3 ‰.

2.8.2. Гидрохимическая структура вод

Параллельно с аномальными физико-динамическими условиями летом в самом продуктивном районе Черного моря наблюдаются также и катастрофические изменения гидрохимического режима вод придонного слоя.

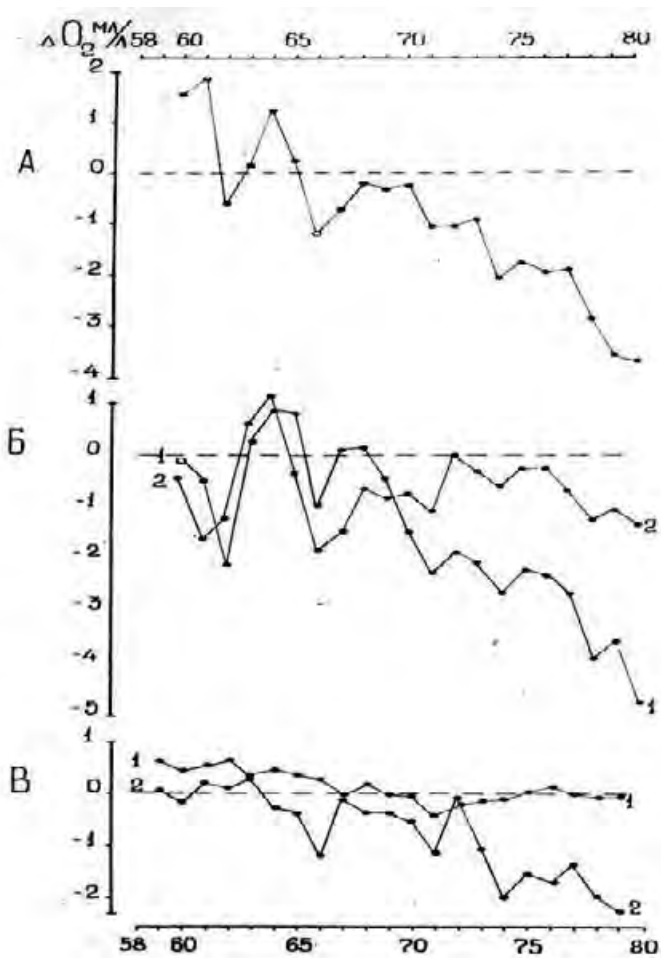


Рис. 2.26. Динамика трендов (ΔO_2) концентраций кислорода (мл/л) в придонном слое в летний сезон на северо-западном шельфе Черного моря с 1958 по 1980 г. [Фащук, 1985].
(Разрезы: А – Тендровская коса – Одесса; Б – Каркинитский залив – оз. Шаганы; В – мыс Тарханкут – Сулина.)

I. Со второй половины 60-х гг. на акватории Черного моря севернее линии м. Тарханкут – Дунай летом наблюдается резкое снижение концентраций O_2 в придонном слое вод. Прогрессирующая отрицательная тенденция этой характеристики в междуречье Днестр – Дунай и районе Одесса – взморье Днепра достигает 3,65 и 4,75 мл/л за 23 года (рис. 2.26).

В восточном направлении (Каркинитский залив) ее величина снижается, а в районе м. Тарханкут тренд достигает нуля.

II. С 1978 г. гипоксия, наблюдавшаяся эпизодически на северо-западном шельфе Черного моря в предыдущие годы (с 1927 г.), стала развиваться ежегодно.

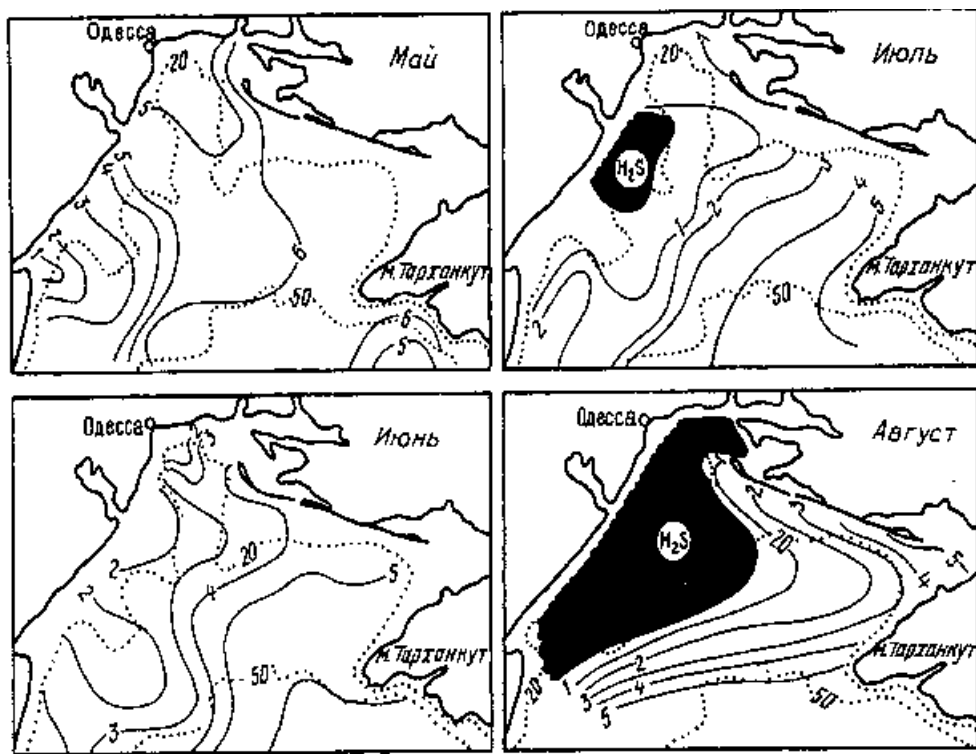


Рис. 2.27. Сезонное развитие придонной гипоксии на северо-западном шельфе Черного моря [Фащук и др., 1999].
Изолинии – концентрации кислорода в мл/л.

III. Возникая в мае на традиционных приустьевых участках шельфа и занимая при этом 6 – 20 % площади его акватории, явление распространяется к концу лета на открытые участки СЗЧМ (глубины 30–40 м), в заливы без пресного стока, охватывая до 60–80 % площади акватории – до 40 тыс. км² (рис. 2.27).

IV. При глубине моря 10–15 м толщина слоя гипоксии достигает 5–6 м, а на глубинах 30–40 м дефицит кислорода в придонном слое имеет вертикальное развитие до 12–15 м.

V. Аналогичные ситуации встречаются и в других приустьевых районах Мирового океана, например, на взморье р. Миссисипи в Мексиканском заливе или в приустьевом районе р. Янцзы в Южно-Китайском море (рис. 2.28).

VI. В конце лета на участках шельфа, занятых гипоксией, начинается образование сероводорода. В 1983 г., например, площадь сероводородной зоны составила здесь 5 тыс. км² (10 % площади акватории), запас сероводорода превысил 15 тыс. т, а толщина слоя сероводородсодержащих вод колебалась от 2 до 10 м при глубинах моря соответственно 8 и 25 м (рис. 2.29).

VII. Концентрации сероводорода в придонном слое изменяются от 0,2 в начальный период развития явления (июль) до

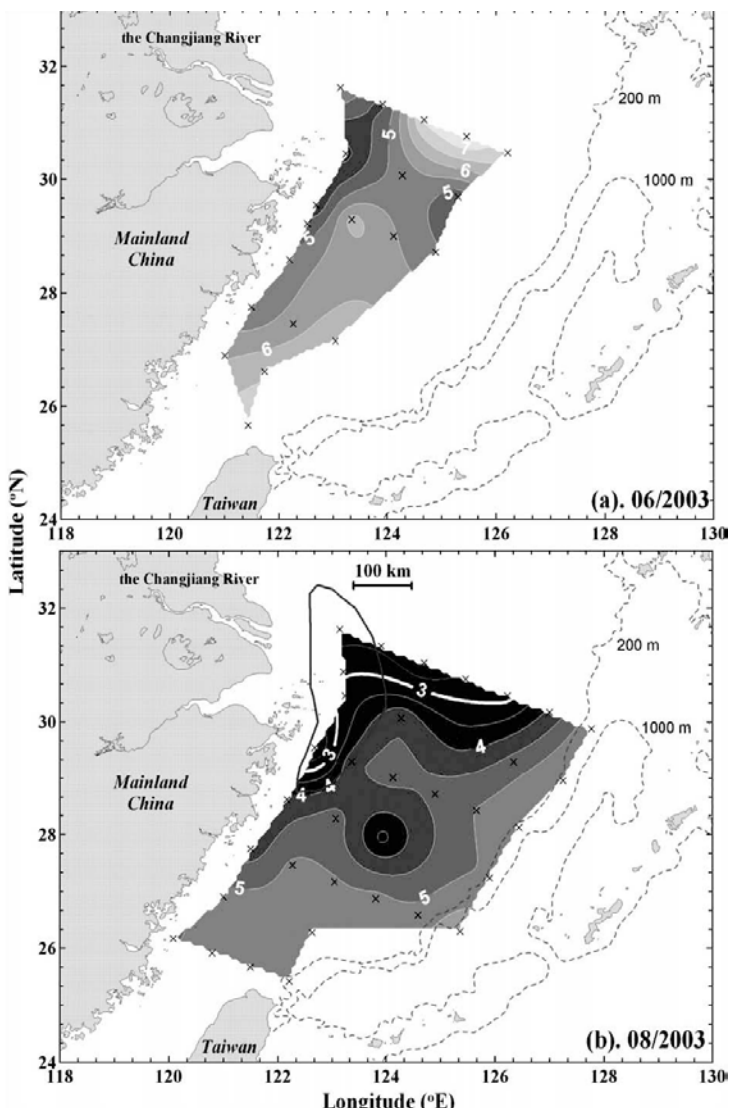


Рис. 2.28. Распределение кислорода (мг/л) в приустьевом районе р. Янцзы в Южно-Китайском море в июне (а) и в августе (б) 2003 г. [Chen, 2007]. Зоны гипоксии (<3 мг/л) площадью до 12 тыс. км² занимают глубины шельфа от 30 до 70 м.

2,0 мл/л в конце лета–начале осени. В августе 1990 г. в открытой части шельфа они составляли 0,2–0,7 мл/л, при этом 40 % площади района было занято водами с сероводородом.

VIII. Масштабы межгодовых колебаний размеров акваторий с гипоксией в конце лета изменяются в зависимости от величины стока основных рек в характерные месяцы (июнь-июль для Дуная и май-июнь для Днестра):

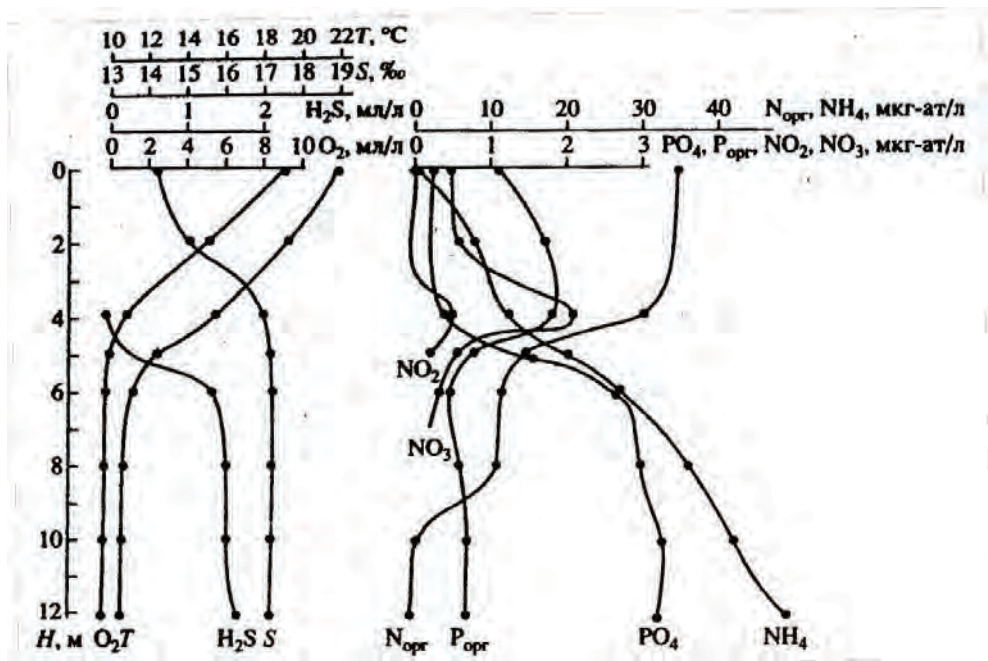


Рис. 2.29. Типичное вертикальное распределение гидрологических и гидрохимических характеристик воды в летний сезон на северо-западном шельфе Черного моря [Фащук, 1995].

Несмотря на мелководье, из-за высоких вертикальных градиентов температуры и солёности перемешивание вод ослаблено. В придонном слое развиваются гипоксия и анаэробные условия.

Толщина анаэробного слоя составляет 8 м при глубине моря 12 м, а концентрация в нем сероводорода достигает 2 мл/л – как в открытой части моря на горизонте 200 м.

- в Дунайской области придонная гипоксия сохраняется до сентября при величине стока Дуная за июнь–июль 70 км³;
- для центральных районов северо-западного шельфа подобные условия обеспечиваются при стоке Днестра за май–июнь 4 км³.

IX. Придонная концентрация кислорода в районе Одессы в августе прямо зависит от суммарного стока органического вещества с водами Днепра за июль–август.

X. Явление гипоксии и сероводородного заражения придонного слоя вод северо-западного шельфа Черного моря в летний период регулярно наблюдается и в начале XXI века.

2.8.3. Механизм влияния количественных и качественных изменений речного стока на гидрологическую и гидрохимическую структуру вод шельфа

Многолетний (1979–1991) мониторинг летней гипоксии и анаэробных зон на шельфе Черного моря позволил установить цепочку причинно-следственных связей, составивших механизм развития этих явлений.

1) До начала активной хозяйственной деятельности распределение поверхностного слоя вод в процессе весеннего паводка вызывало естественную трансформацию слоя скачка плотности «сверху», что приводило к росту вертикальных градиентов этой характеристики (рис. 2.30).

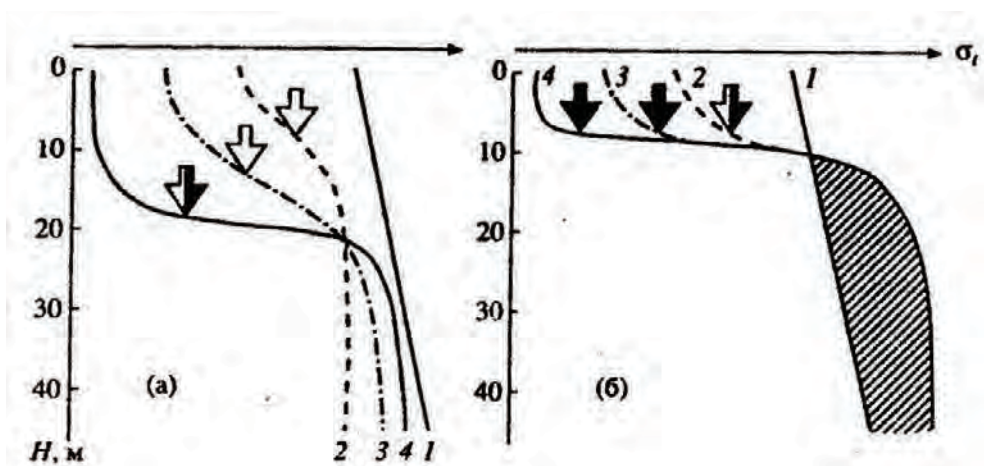


Рис. 2.30. Схема трансформации вертикальной структуры вод северо-западного шельфа Черного моря в летний сезон под влиянием природных (а) и антропогенных (б) факторов [Фащук и др., 1999]. Распределение плотности воды: 1 – среднегодовое; 2 – среднемноголетнее для лет в маловодные годы; 3 – среднемноголетнее для лета в нормальные по водности годы; 4 – среднемноголетнее для лета в многоводные годы.

Штриховка – летнее повышение плотности придонного слоя вод после зарегулирования речного стока в результате компенсационного проникновения в приустьевые районы более соленых вод из открытых районов шельфа.

Стрелки: черные – обмен кислородом подавлен, развита придонная гипоксия; белые – обмен кислородом благоприятный, гипоксия не развивается; черно-белые – обмен кислородом неустойчивый, гипоксия развивается периодически.

2. В годы с суровыми зимами (интенсивное выхолаживание, большой запас холодных вод в придонном слое к лету), теплой весной (интенсивный прогрев поверхностных вод) и маловетренным летом (ослабленное перемешивание вод) после паводков обмен

кислородом по вертикали на акватории шельфа оказывался подавленным. Вероятность такого явления в годы с большими паводками выше, чем в нормальные и маловодные.

3. В сложившихся неблагоприятных для обмена O_2 физико-динамических условиях в СЗЧМ, в процессе естественной деструкции ОВ без доступа кислорода формируется гипоксия вод.

4. Таким образом, эпизодическое возникновение дефицита O_2 в придонном слое исследуемого района до интенсификации хозяйственной деятельности было обусловлено сочетанием естественно-климатических процессов – водности рек, суровости зим, степенью весенне-летнего прогрева и ветровым режимом над акваторией в летний период. Содержание ОВ и скорость его деструкции в естественных условиях всегда достаточны для развития под пикноклином гипоксии вод при отсутствии доступа сюда кислорода.

5. После зарегулирования и эвтрофирования стока рек к природным физико-динамическим механизмам формирования анаэробных зон добавились два процесса, определивших интенсификацию явления гипоксии, – поступление соленых вод в приустьевые участки шельфа в придонном слое и ослабление стоковых течений.

6. Первый из указанных механизмов определил трансформацию (рост вертикальных градиентов плотности) пикноклина «снизу», а второй – образование на шельфе застойных зон.

7. Совместно с наблюдавшейся ранее естественной трансформацией слоя скачка плотности в период паводков экологический эффект добавившихся по антропогенным причинам механизмов проявляется сегодня в прекращении аэрации придонного слоя вод не только при совпадении природных факторов, а практически ежегодно.

8. Кроме того, параллельно с ослаблением доступа кислорода в глубинные слои вод шельфа под влиянием физико-динамических факторов эвтрофирование вод привело к интенсификации биохимических механизмов его потребления. По этой причине дефицит O_2 стал формироваться здесь значительно быстрее, сохраняться дольше, возникать в годы с непродолжительной стагнацией вод независимо от совпадения климатических факторов, которое может только усугублять или ослаблять этот процесс во временном или пространственном масштабах.

9. Завершающим этапом развития гипоксии вод в указанных условиях оказывается образование сероводородной зоны в результате деятельности сульфатредуцирующих бактерий в анаэробной среде.

2.8.4. Механизм изменения химического состава вод шельфа и показателей их биологической продуктивности

Упомянутое эвтрофирование вод шельфа Черного моря является реакцией морских водных ресурсов на изменение режима

и химического состава речного стока. Образование на основных черноморских реках водохранилищ (на Дунае их около 20, а на Днепре – 7 крупных и более 250 тыс. мелких в бассейне реки) определило тот факт, что минеральные соединения фосфора и азота стали интенсивно расходоваться на их акваториях. Вода в водохранилищах «зацвела», а, следовательно, значительная часть фосфора выносится теперь в море не в форме минеральных фосфатов, а в составе органических соединений вместе с продуктами своей деструкции – аммонием и мочевиной. Кремний, выносившийся раньше в море в виде взвеси и коллоидов, теперь осел в донных осадках водохранилищ, и его вынос в море резко сократился.

Аналогичные изменения произошли и с азотом – сократился вынос в море нитратов, но возросло содержание органического и аммонийного азота. Но самое главное – значительно (в 5–12 раз) возросло количество выносимого реками в море органического углерода. Море лишилось таким образом основного сырья для формирования свежего органического вещества (ОВ), но стало получать готовую вторичную органику из водохранилищ вместе с «цветущими» здесь диатомовыми водорослями (вид ризосоления), которые морским зоопланктоном в пищу не используются.

За 1928–1978 гг. средняя концентрация фосфатов в поверхностном (0–50 м) слое Черного моря уменьшилась в 5 (с 1,54 до 0,35 мкг-ат/л), а кремния – в 11 (с 54 до 5 мкг-ат/л) раз. Средняя концентрация нитратов здесь за этот период уменьшилась приблизительно в 8–10 раз. Содержание же органического углерода возросло с 2–3 до 8–12 мгС/л. Соответственно, резко увеличились концентрации органического фосфора и органического азота (до 1–1,2 и 11–25 мкг-ат/л). В северо-западной части моря, особенно в приустьевых районах, эти величины возрастают на порядок и более.

В зоне черноморского шельфа в 1988–1991 гг. значительно увеличилось содержание аммонийного азота (до 2,2 мкг-ат/л), хотя в глубоководной части моря содержание аммония в поверхностном слое практически не изменилось (0,2–0,4 мкг-ат/л). В настоящее время в прибрежной мелководной зоне моря фиксируются очень высокие (до 11–19 мкг-ат/л) концентрации мочевины.

В 1994–1997 гг. на взморье Дуная концентрации фосфатов в поверхностном слое (до 84 мкг/л) были ниже данных 70–90-х гг. в три-четыре раза. Также уменьшилось здесь по сравнению с указанным периодом и содержание органического фосфора – от 25–129 до 14–61 мкг/л; аммонийного азота – от 500–700 (максимум – 1500 мкг/л) до 20–72 (максимум 354 мкг/л); нитритов – от 50 до 14 мкг/л по средним величинам; нитратов – от 610 до 136 мкг/л. В то же время концентрации органического азота на взморье Дуная в силу интенсивного развития продукционных процессов в весенне-летний период сегодня могут из-

меняться от 108 до 15950 мкг/л, являясь экстремальными для морской воды.

К 2001 г. на взморье Дуная по сравнению с данными предыдущих пяти лет отмечено уменьшение концентраций аммонийного азота – в 2–3, нитратов – в 1,5–2, фосфатов – в 1,5–3 раза. При этом содержание органических соединений азота увеличилось в два-четыре раза, и такая тенденция сохраняется.

Эти процессы вызвали рост биомассы мелких микрогетеротрофных организмов – основных потребителей такой органики. В результате возросли скорости деструкции ОВ и, соответственно, регенерации БВ и биопродукции на их рециклинге. Большая часть летней первичной продукции ОВ сегодня создается за счет активной регенерации фосфатов, аммония и кремнекислоты. Однако ОВ, созданное на рециклинге биогенных веществ, не служит источником питания для зоопланктона и промысловых рыб. В основном оно вовлекается в более короткий круговорот «фитопланктон – бактерии – простейшие – фитопланктон». В результате ухудшается кормовая база промысловых рыб и снижается биопродуктивность водоема.

Увеличение скорости продукционно-деструкционных процессов привело к массовому развитию бактерий и простейших, а также короткоциклового вида – ноктилюки, медуз, гребневика. Величина биомассы бактерий в Черном море в летний сезон (максимум развития) в 1977–1978 гг. возросла по сравнению с периодом 1951–1967 гг. в 1,5–3 раза, а в 1989 г. этот показатель превышал данные 1964 г. в пять раз. При этом продукция микроорганизмов увеличилась в пять-восемь раз. За последние 20 лет биомасса фитопланктона в СЗЧМ возросла в 26 раз. По всему морю его концентрации увеличились с 52 до 1000 г/м³, при этом доля диатомовых водорослей в их общей биомассе сократилась до 40, а перидиниевых – мелкоклеточных видов, возросла с 18,8 до 54,4 %.

Ускорение оборота органического вещества и биогенных элементов в продукционно-деструкционном цикле прибрежных вод вызвало появление в конце 1970-х гг. в Черном море «красных приливов» – мощных цветений *Euxyiaella cordata*, *Goniaulax Poliedra*, *Goniaulax Poligramma*, а также массовое развитие инфузорий типа *Mezodinium rubrum*. Такие явления сохраняются здесь и в настоящее время (фото 2.12).

2.9. Международное сотрудничество по водным проблемам суши

1. В настоящее время в мире действует более 200 межгосударственных договоров и соглашений в области использования и охраны природных вод. В 1947 г. главы государств Европы, Северной Америки, Центральной Азии и Израиля учредили Европейскую эко-



Фото 2.12. Зоны массового «цветения» водорослей в летний сезон на северо-западном шельфе Черного моря хорошо видны из космоса.

номическую комиссию Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН), ставшую региональным форумом правительств этих стран. С 1966 г. в рамках этой комиссии функционирует Комитет по водным ресурсам – координатор мероприятий по вопросам водопользования и охраны вод.

2. В 1968 г. Генеральная Ассамблея ООН рассмотрела вопрос о надвигающемся кризисе в использовании природной среды (в том числе и водной). В 1977 г. на конференции ООН по водным ресурсам, проходившей в Аргентине (г. Мар-дель-Плата), были сформулированы основополагающие принципы рационального природопользования и охраны водных ресурсов **«в интересах нынешнего и будущих поколений»**. А в 1992 г. в Рио-де-Жанейро (Бразилия) главы правительств практически всех стран мира подписали Декларацию ООН, провозгласившую эти принципы. Их основу составляют:

- сокращение потребления воды во всех секторах экономики;
- развитие оборотного и повторного водоснабжения;
- охрана вод от загрязнения;
- совершенствование законодательства и системы управления водопользованием;
- участие общественности в принятии решений по использованию и охране вод.

Только в сентябре 2003 г. на всемирной встрече на высшем уровне в Йоханнесбурге (ЮАР) были приняты решения по реализации Декларации в Рио-де-Жанейро 1992 г. – обеспечению устойчивого водопользования.

3. В 1996 г. была введена в действие Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, принятая ЕЭК ООН в 1992 г. в Хельсинки. К ней присоединилось большинство стран Европы, а с 2003 г. специальными поправками разрешено участие в Конвенции стран, расположенных за пределами европейского континента. Конвенция обеспечивает правовую основу международного сотрудничества в области использования и охраны рек, озер и подземных вод. Ее принципы стали основой многих международных соглашений, в том числе и многостороннего соглашения об охране реки Дунай, заключенного в 1994 г. между 18 странами, расположенными на территории дунайского водосбора.

4. В октябре 2000 г. в Люксембурге на совместном заседании Европейского парламента и Совета Европейского союза была принята Водная рамочная директива, содержащая основные принципы рациональной водной политики в Европейском союзе. Основной целью этого документа является достижение к 2015 г. «хорошего экологического состояния» всех водных объектов.

5. В Европе в настоящее время введено в действие более 60 директив по различным водным проблемам: охрана поверхностных вод, качество питьевой воды, состояние экосистемы Балтийского моря и др. Сегодня успешно функционирует Международная Дунайская комиссия, разрабатывающая рекомендации по обеспечению судоходства, режима работы ГЭС, поддержанию качества вод реки и ее притоков, защите территорий от затопления и аварийного загрязнения.

6. После техногенной катастрофы в октябре 1986 г. на химическом складе в г. Швайцхалле (Германия) в Рейн попало около 30 тонн пестицидов и красящих веществ, что привело к экологическим кризисам в реке и прибрежных районах Северного и Балтийского морей (гибель рыбы и тюленей, развитие ядовитых водорослей-убийц). После реализации международной программы «Лосось-2000» в течение 20 лет в р. Рейн восстановилось более 50 видов рыб (в том числе лосось и форели).

Для защиты жителей бассейна Рейна от паводков сейчас реализуется международная программа «Рейн-2020» стоимостью 12 млрд. евро.

7. В 2004 г. завершился первый этап международной программы «Экологическое оздоровление реки Днепр» – разработаны Стратегический план действий и Программа трансграничного мониторинга, которые поэтапно реализовываются с 2006 г.

8. В 1972 г. в Стокгольме на конференции ООН была высказана идея создания **Глобальной системы мониторинга окружающей среды** (ГСМОС), а в 1974 г. при встрече в г. Найроби

(Кения) главы государств стран членов ООН заложили реальные основы этого мероприятия. **С 1977 г.** в рамках ГСМОС начала реализовываться международная программа **ГСМОС/ВОДА**, в которой принимают участие: Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), Всемирная метеорологическая организация (ВМО), Организация ООН по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО). Глобальный центр данных по программе ГСМОС/ВОДА находится в г. Берлингтон (Канада).

9. С 1990 г. после завершения первого этапа реализации программы ГСМОС/ВОДА (создание систем мониторинга, интеркалибрация методик, общие оценки состояния проблемы загрязнения пресных вод планеты) было принято решение о переходе ко второму этапу ее реализации, с акцентом на интерпретацию данных мониторинга с целью:

- определения качества естественных пресных вод (фон);
- выявления долгосрочных тенденций в критических уровнях показателей качества пресных вод;
- оценки потоков химических веществ из крупнейших речных бассейнов на границе раздела **континент–океан**.

Российская национальная программа мониторинга и оценки качества вод. С 1992 г. Россия официально включена в программу ГСМОС/ВОДА. Национальным центром по ее реализации стал Гидрохимический институт Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (г. Ростов-на-Дону). Сеть наблюдательных пунктов, включенных в **Национальную подсистему РФ в ГСМОС/ВОДА**, составляет 27 станций, оценивающих: антропогенное воздействие (восемь пунктов), вынос веществ в моря (одиннадцать пунктов) и фоновое состояние водных объектов (восемь пунктов). Результаты наблюдений отправляются по установленной форме в штаб программы в Канаду (г. Берлингтон). Они включают определения следующих показателей: расход, температура, электропроводность, pH, взвешенные вещества, БПК₅; ионы – Na, K, Ca, Mg, HCO₃, Cl, SO₄; все формы минерального азота, общий фосфор, Si, Cu, Zn, Fe, Pb, Hg.

2.10. Международное сотрудничество в области исследования Мирового океана

Большую часть многовековой истории изучения Мирового океана (более шести тысяч лет) занял стихийно-научный период, в течение которого представители практически всех народов и цивилизаций планеты случайно или намеренно вносили свой вклад в определение границ, глубины и контуров берегов, соотношения суши и моря, а также климата и погодных условий в различных его районах. При этом как в древние времена, так и в эпоху Великих географических открытий у исследователей (купцов, полити-

ков, полководцев, географов-путешественников и просто мореходов-авантюристов) мыслей о международном сотрудничестве по вполне понятным причинам не возникало.

К началу XIX века трудами мореплавателей всех стран мира было накоплено огромное количество информации о природе Мирового океана. Собранные экспериментальные данные легли в основу первых гипотез, объясняющих механизмы явлений, наблюдаемых в морской среде. Развитие научной мысли, таким образом, привело естествоиспытателей к выводу о необходимости международного сотрудничества в области исследований Мирового океана. В 1853 г. в Брюсселе на первой в истории морской науки международной конференции по метеорологии и морской географии по инициативе американского морского офицера Метью Фонтэна Мори (1806–1873) руководителя гидрографической службы США, представители крупных морских держав приняли решение об организации регулярных наблюдений за параметрами системы океан–атмосфера в навигационных целях и разработали конкретные способы их осуществления (единые формы журналов судовых наблюдений). Россия была в числе десяти стран-участниц конференции, ее представлял капитан-лейтенант А. С. Горковенко.

В 1855 г. вышла в свет работа М. Мори *«Физическая география моря»*, в которой было собрано и проанализировано все, «что имело отношение к морю с момента его открытия человеком». Этот труд содержал итоговые карты ветров и морских течений Мирового океана и стал, по сути, первым учебником по практической навигации для многих поколений мореплавателей. В исследовании утверждалось, что *океан и атмосфера представляют единую систему* и знание принципов ее функционирования имеет огромное практическое значение не только для моряков.

После Брюссельской конференции с 1857 г. отправляющиеся в океанское плавание военно-морские суда России начали заполнять по единой форме журналы судовых гидрометеорологических наблюдений и регулярно отсылать эту информацию М. Мори в Вашингтон. Таким образом, 1853–1857 гг. можно считать периодом начала международного сотрудничества нашей страны в области исследований природы Мирового океана – в 2007 г. этому событию исполнилось 150 лет.

2.10.1. Исследования Мирового океана до середины XX века

После завершения плавания английского корвета «Челленджер» (1872–1876), открывшего эру описательных комплексных научных исследований Мирового океана, с конца XIX и в течение XX века морские физики, биологи, геологи, метеорологи разных стран начали всесторонний штурм «тайн» Нептуна. Изучались рельеф морского дна и структура земной коры, циркуляция вод и атмосферные процессы, температура, соленость, кислородный режим, содержание химических элементов, состав сообществ

живых организмов. Долгое время эти исследования проводились без определенной системы, а их объем, структура и география определялись экономическими интересами и возможностями конкретного государства.

Первая важнейшая международная программа исследования Земли – *Международный полярный год* (МПГ) 1882–1883 гг., была организована с целью получения синхронных данных о состоянии главным образом верхних слоев атмосферы планеты в высоких широтах, изучения тропосферных явлений, а также ледовых условий в прибрежной зоне и в устьях рек этих регионов. Наблюдения включали работы на двух российских полярных станциях на Новой Земле (Малые Кармакулы) и в устье Лены, геофизические, метеорологические и биологические наблюдения ученых 12 стран в 13 пунктах Северной полярной области, а также на мысе Горн и острове Южная Георгия. В результате была получена не только уникальная научная гидрометеорологическая и геофизическая информация, но и накоплен первый опыт международного научного сотрудничества.

Следующий важный этап – Международный географический конгресс (Берлин, 1899), поддержавший решения специальной конференции (Стокгольм, 1899) о создании Международной комиссии по изучению морей с целью рациональной эксплуатации их биологических ресурсов. Это предложение было осуществлено в 1902 г. в Копенгагене при участии девяти стран, включая Россию. 22 июля 1902 г. на Копенгагенской конференции был учрежден первый международный океанографический орган – *Международный совет по исследованию моря* (МСИМ-ICES).

Россия стала активным участником МСИМ. Ее представителями в совете были известный гидрограф, вице-адмирал С. О. Макаров (1848–1904) и основатель промысловой океанологии, зоолог, академик Н. М. Книпович (1862–1939). За нашей страной были закреплены линии-разрезы в северной и восточной частях Балтийского моря, а также в Баренцевом море, на которых четыре раза в год на стандартных горизонтах должны были проводиться комплексные океанологические наблюдения с целью исследования влияния внешних условий на морских обитателей и разработки методов предсказания погоды.

Через 50 лет после первого МПГ был проведен *второй Международный полярный год* (II МПГ). С 1 августа 1932 г. в течение 13 месяцев ученые 44 стран проводили метеорологические и геофизические наблюдения на 115 советских береговых станциях, а также морские исследования во всех морях, омывающих берега Советского Союза. В навигации 1932 и 1933 гг. были проведены почти одновременно 15 экспедиций на 26 судах. Результаты этих работ стали основой для разработки методик гидрометеорологических и ледовых прогнозов, прояснили особенности гидрометеорологического режима Арктики для ее хозяйственного освоения. Полному использованию материалов II МПГ помешала Вторая мировая война.

После войны международное сотрудничество по исследованию

Мирового океана вышло за пределы изучения его высоких широт и трансформировалось в идею *Международного геофизического года* (МГГ) – крупнейшего научного международного мероприятия середины XX века. В нем приняли участие около 60 тыс. ученых из 67 стран. С 1 июля 1957 г. по 31 декабря 1958 г. в Мировом океане многочисленными экспедициями по общей программе, под единым руководством велся сбор информации, которая в дальнейшем обрабатывалась также по единой методике. Впоследствии по инициативе советских ученых МГГ под условным названием «Международное геофизическое сотрудничество» был продлен еще и на 1959 г. Для обработки и хранения собранных в период МГГ данных правительства двух ведущих стран согласились организовать у себя и финансово поддерживать учреждения, ранее не имевшие аналогов, – *Мировые центры данных* (МЦД – WDC). Один из них (МЦД-А) в США, другой (МЦД –Б) – в СССР (Обнинск) [*FASI.GOV.RU/SEA*].

В 1959 г. в Нью-Йорке состоялся Первый международный океанографический конгресс, на котором были подведены итоги полувекового исследования Мирового океана. После анализа всех полученных материалов оказалось, что некоторые его районы изучены достаточно хорошо, другие – не исследованы вовсе. Более того, даже в сравнительно изученных океанических зонах обеспеченность физическими, химическими, биологическими данными оказалась различной.

В итоге накопленная за 50 лет информация не позволила составить комплексного представления о распределении и временной изменчивости характеристик вод Мирового океана. При этом конгресс констатировал тот факт, что ни одна страна мира не располагает достаточными техническими средствами и материальными возможностями для всесторонней организации работ в открытом океане. Сотрудничество в области изучения океана – задача огромного числа межправительственных и негосударственных организаций и фондов, рабочих групп и т. д. В результате вслед за МГГ последовали международные программы по исследованию океанов, позволившие объединенными усилиями нескольких стран получить синхронную картину распределения океанологических показателей на больших акваториях.

В рамках этих программ в течение следующего десятилетия (1960–1970) международное сотрудничество осуществлялось в четырех основных направлениях: качество морской среды и определяющие его факторы; оценка тенденций в изменении условий морской среды на основании собранной ранее информации; биологические ресурсы, факторы, определяющие их продуктивность, и способы их рациональной эксплуатации; исследование морского дна для оценки распределения, характера и величины запасов минеральных ресурсов Мирового океана.

Одним из грандиозных событий этого периода можно назвать постройку в США и введение в эксплуатацию в 1968 г. бурового судна с динамической стабилизацией «*Glomar Challenger*» и начало осуществления в этой связи программы глубоководного бурения (сегод-

ня «Международная программа бурения дна океана»). В ней приняли участие ученые из 21 страны. К 1980 г. программу финансировали, кроме США, еще пять стран (в том числе и СССР). В результате было пробурено более 600 скважин в различных районах Мирового океана с глубинами до 6000 м. Максимальное проникновение в недра земной коры под океаническим дном составило 2000 м. В 1985 г. на смену «Glomar Challenger» в США было построено новое буровое научно-исследовательское судно «JOIDES Resolution» (Joint Oceanographic Institution for Deep Earth Sampling Resolution). С него был установлен рекорд глубоководного бурения – 2105 м под дном океана (у берегов Коста-Рика в Тихом океане). Наконец, в 2003 г. в Японии спустили на воду гигантское геологическое научно-исследовательское судно «Chikyu» – «Земля». Его длина – 210 м, водоизмещение – 57 тыс. тонн, буровая установка возвышается над водой на 121 м, а общая длина буровой колонки составляет 10 км. С помощью этого плавучего геологического института японские ученые надеются пробурить океаническую кору нашей планеты (5–7 км) и добраться до мантии Земли, чтобы узнать ее состав, раскрыть секреты минерального синтеза нефти и природы землетрясений.

К середине XX века по мере углубления знаний о природе океана выяснилось, что и пространственная, и временная изменчивости его характеристик очень значительны. Иными словами, выполняя крупномасштабные синхронные съемки акватории с расстоянием между измерениями (станциями) в 1–2°, мы зачастую просто пропускаем многие тонкости структуры, например, особенности циркуляции вод, что влечет ошибки в интерпретации распределения других характеристик. В этой связи в 1960–1980 гг., кроме крупномасштабных геологических исследований Мирового океана, в отдельных его районах были организованы наблюдения на специальных полигонах с более густой сеткой измерений. Так, в Международной индоокеанской экспедиции в Аравийском море (1959–1965 гг.), например, приняли участие 13 стран, работало 46 кораблей, в том числе пять советских. Далее последовали Атлантический тропический эксперимент (ТРОПЭКС), Проект исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП) и др. Наиболее крупный из таких экспериментов, направленный на изучение крупномасштабных вихрей и перемешивания в открытых районах океана (ПОЛИМОДЕ), провели в 1977–1978 гг. в Западной Атлантике между Ньюфаундлендом и Антильскими островами ученые СССР, США, Англии и Канады.

Не менее грандиозный Международный геодинамический проект был осуществлен в это же время для исследования процессов формирования геологических особенностей поверхности Земли (тектоники литосферных плит) и географии месторождений полезных ископаемых. В нем приняли участие 50 стран мира, включая и СССР. Была выполнена уникальная франко-американская подводная съемка центрального рифта Срединно-Атлантического хребта на подводных аппаратах «Архимед», «Алвин» и «Сиана».

Несмотря на огромную ценность данных указанных крупномасштабных международных проектов – синхронных съемок оке-

ана, непрерывно выполнять подобные работы в течение многих лет усилиями даже нескольких стран было практически невозможно, в первую очередь по экономическим причинам. Поэтому в конце 1960-х гг. наряду с *периодическими* синхронными съемками больших акваторий океана в его открытых районах – характерных энергетически активных точках (Северная Атлантика, Тихий океан), со специальных научно-исследовательских кораблей погоды, меняющихся через каждые три месяца, были организованы *регулярные* ежесуточные международные наблюдения. Параллельно на разрезах в Атлантическом и Тихом океанах стала осуществляться программа ГЕОСЕК, включавшая наблюдения за распределением геохимических характеристик морских вод для познания крупномасштабных океанологических процессов.

Таким образом, до середины XX века основная задача международного сотрудничества в области исследования Мирового океана состояла в накоплении информации о характере пространственной и временной изменчивости его океанологических характеристик, изучении особенностей гидрометеорологического режима и основных природных механизмов, определяющих изменчивость условий морской среды.

2.10.2. Структура международной сети организаций для исследования природы Земли

В современном мировом природопользовании выделяют ряд основных проблем и перспектив исследований, связанных как с природными (климатическими), так и антропогенными (хозяйственная деятельность) изменениями условий среды на нашей планете. Кроме того, в XXI веке в некоторых районах Мирового океана и внутренних морях России произошло обострение геополитической обстановки, связанное с открытием новых запасов и освоением традиционных видов морских ресурсов, изменением экономической и политической ситуации в некоторых государствах СНГ и соответствующих отношений России с ведущими мировыми державами. Это привело к возникновению в международном морском природопользовании ряда проблем правового характера.

К наиболее актуальным вопросам исследования Мирового океана относятся: ***проблема «парникового эффекта» и глобальных изменений климата; влияние Мирового океана на состояние климатической системы планеты; антропогенные изменения морских экосистем; контроль условий морской среды в районах активной хозяйственной деятельности; установление границ экономических зон в Мировом океане России с Японией, Украиной и Норвегией.***

К началу XXI века масштабы сотрудничества ученых разных стран в области наук о Земле существенно увеличились. С конца XIX до середины XX века в мире осуществлялась лишь одна международная научно-исследовательская программа – «Международный полярный год». В 1970-х годах их уже было 12, в

1980-х – восемнадцать, а в последнее время только крупных программ глобального уровня существует более 100.

Для более эффективного поиска информации об океане, о проектах в области океанологии и о морских организациях МОК ЮНЕСКО поддерживает специальный Интернет-сайт под названием **«Океанский портал»** («Ocean Portal»), содержащий на начало 2007 г. более 4600 ссылок по морской тематике, включая более 1200 источников данных и информацию о более чем 1100 морских организациях (в том числе 110 – международных). Адрес этого сайта в Интернете: <http://www.oceanportal.org>. В России наиболее полные ссылки на мореведческие организации и проекты можно найти на сайте Межведомственной национальной океанографической комиссии (НОК России) по адресу: http://www.extech.ru/s_e/ocean.

В 2000 г. был открыт **Европейский центр информации по морской науке и технологиям (ЕврОкеан – EurOcean)**, который курирует ряд региональных в области морских исследований и технологий. С 2006 г. Россия участвует почти в 30 проектах с европейскими учеными. Четверть проектов касались проблем Балтийского моря, остальные – Северо-Европейского бассейна, Арктики, Черного моря. Три четверти этих проектов выполняются в связи с **Шестой рамочной программой** (РП-6 – FP-6) ЕС, являющейся основным механизмом и первым практическим этапом создания единого европейского научного пространства. В 2007–2013 гг. Евросоюз планирует осуществить очередную **Седьмую рамочную программу** (РП-7–FP-7) с целью поддержки и развития науки и исследований в едином пространстве стран-членов Евросоюза.

Под эгидой МОК ЮНЕСКО организована система *Международного обмена океанографическими данными* (МООД). Она включает сеть мировых (США, Россия, Китай) и более 60 национальных центров океанографических данных. Мореведческие организации России участвуют в МООД через ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета (физическая океанография и гидрометеорология) и через Министерство природных ресурсов РФ (информация по геологии и геофизике).

Во второй половине XX столетия на развитие международных научных связей мощное влияние оказало появление на мировой политической арене таких глобальных вопросов, как предотвращение ядерной войны, демографическая, продовольственная, энергетическая, экологическая проблемы. В этой связи большие надежды человечества были возложены на созданную в 1945 г. *Организацию Объединенных Наций* взявшую на себя ответственность за обеспечение прочного мира и расширение сотрудничества всех государств в вопросах экономического и социального развития. С целью исследования природы Земли и решения экологических проблем на нашей планете в системе ООН был создан ряд международных организаций, непосредственно осуществлявших деятельность в этом направлении (табл. 2.10).

В дальнейшем в рамках ООН появились вспомогательные органы со структурой и функциями межправительственных организаций, обладающие самостоятельными источниками финансирования

[*FASI.GOV.RU/SEA*] (табл. 2.11). Решениями Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио, 1992 г.) и Всемирного саммита по устойчивому развитию (Йоханнесбург, 2002 г.) одна из них – Межправительственная океанографическая комиссия (МОК), была признана ключевой организацией системы ООН в области океанологии и использования океана в хозяйственной деятельности.

Таблица 2.11.

**Международные организации системы ООН,
участвующие в исследованиях океана**

Организация	Год создания	Цель создания
ООН по вопросам просвещения, науки и культуры (ЮНЕСКО–UNESCO)	1946	Сотрудничество государств по вопросам экономического и социального развития
ООН по вопросам продовольствия и сельского хозяйства (ФАО–FAO)	1946	В том числе вопросы рыболовства и марикультуры
Всемирная метеорологическая организация (ВМО–WMO)	1951	Программы исследования роли океана в климатических изменениях
Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ–IAEA)	1957	Координация вопросов использования ядерных установок на судах, контроля радиоактивного загрязнения морей
Международная морская организация (ММО–IMO)	1959	Безопасность морских перевозок и предотвращение загрязнения морей

Таблица 2.12.

**Межправительственные органы системы ООН,
участвующие в исследованиях океана**

Учреждение	Год создания	Цель создания
Межправительственная океанографическая комиссия (МОК–IOC) (на 2003 г. – 129 стран)	1960	Содействие международному сотрудничеству и координация программ: организация совместных экспедиций и международного обмена океанографическими данными; решение глобальных и региональных проблем человечества, связанных с Мировым океаном
Программа развития ООН (ПРООН–UNDP) (150 стран, 6500 проектов на 800 млн. долл. США ежегодно)	1965	Техническое содействие развивающимся странам и странам с переходной экономикой, включая охрану морской среды и помощь при чрезвычайных ситуациях

Учреждение	Год создания	Цель создания
Объединенная глобальная система океанических служб (ОГСОС – IGOS)	1969	Организация регулярных наблюдений за вертикальным распределением температуры и солености в верхнем слое океана на основе использования научных, торговых и рыбопромысловых судов, а также дистанционных методов исследования океана
Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП – UNEP)	1972	Анализ и оценка состояния глобальной окружающей среды; предупреждение об экологических угрозах; развитие международного права в области окружающей среды; повышение осведомленности общественности о международной природоохранной деятельности
Международный орган по морскому дну (МОМД – ISA), Международный трибунал по морскому праву	1994	Организация и контроль деятельности в глубоководных районах океана, ресурсы которых определяются как «общее наследие человечества»
Совместная комиссия по океанографии и морской метеорологии (СКОММ – JCOMM) (250 экспертов ВМО и МОК)	1999	Координация управления и обслуживания данных морских наблюдений
Сеть ООН по океанам и прибрежным районам (ООН-океаны или UN-Oceans)	2003	Меры реагирования на цунами; организация регулярного процесса глобальной оценки морской среды; биоразнообразие в морских районах за пределами национальных юрисдикций; защита морской среды от загрязнения в результате хозяйственной деятельности, осуществляемой на суше

Координация участия российских мореведческих организаций в деятельности МОК сначала была возложена на *Национальный океанографический комитет Российской Федерации*, созданный в 1992 г. В 2006 г. комитет был преобразован в *Межведомственную национальную океанографическую комиссию*. Организационно-техническое обеспечение деятельности комиссии возложено на Федеральное агентство по науке и инновациям в России.

2.10.3. Международные программы мониторинга морской среды

В 1990 г. Вторая всемирная климатическая конференция приняла рекомендации по созданию глобальной системы наблюдений за климатом и глобальной системы наблюдений за океаном. В 1991 г.

Ассамблея МОК приняла решение о начале развития **глобальной системы наблюдений за океаном** (ГСНО – GOOS) как одной из основных задач комиссии. В рамках ГСНО в настоящее время выполняется несколько проектов, объединенных в **глобальный эксперимент по усвоению данных об океане** (ГЭУДО – GODAE). Эксперимент направлен на сбор и усвоение данных прямых наблюдений в океане и спутниковых данных в глобальных океанических моделях в реальном масштабе времени с целью описания океанической циркуляции во временных масштабах нескольких дней и пространственных масштабах несколько десятков километров.

По программе **АРГО (ARGO)** планируется создание и размещение в Мировом океане долговременной глобальной сети постоянных океанографических станций на основе дрейфующих буев-измерителей. В настоящее время в Мировом океане работает почти 3000 буев, данные которых позволяют строить ежемесячные карты распределения температуры воды на глубинах. Россия в последние годы выпустила пять буев АРГО в Южном океане, что позволило ей присоединиться к соответствующей международной базе данных.

Еще один проект ГЭУДО **по температуре поверхности океана** высокого разрешения (ГЭУДО – ТПО) предназначен для использования полученных данных в климатических моделях и для корректной оценки потоков энергии между океаном и атмосферой.

Помимо ГЭУДО, в глобальную систему наблюдений за океаном входит **Программа попутных судов** (ППС – SOOP), собирающая измерения обрывных батитермозондов (20–25 тыс. станций в год). ВМО создала **систему добровольных наблюдений судов** (СДНС), проводящих приземные метеорологические и океанографические наблюдения. В 1998 г. более 7000 судов проводили такие наблюдения. В настоящее время их проводят около 4000 судов – вдвое меньше, чем 20 лет назад. Проект **«Глобальная температура и соленость»** (ГТС – GTS) направлен на подготовку интегрированной базы данных по температуре и солености Мирового океана и распространение этих данных для поддержки международных и национальных программ. Основу его составили данные, собранные в рамках проекта ГЭЦО. Программа **«Глобальная сеть данных буев»** (ГСДБ – DBCP) объединяет более тысячи дрейфующих и более 200 заякоренных буев.

Глобальная система наблюдений за уровнем моря (ГСНУМ – GLOSS) содержит 290 станций (в том числе 14 – российских), из них около 180 станций считаются оперативными, регулярно передающими среднемесячные данные уровня моря в Англию в **Постоянную службу среднего уровня моря** (ПССУМ – PSMSL).

В 1991 г. был разработан стратегический план по управлению данными и информацией ГСНО. Политика и координация участия российских организаций в ГСНО осуществляются Национальным океанографическим комитетом Российской Федерации (НОК России). На современном этапе российские организации и специалисты в основном обеспечивают вклад в развитие существующих систем наблюдений и обмена данными (попутные суда, ГЛОСС, МООД, спутниковые системы), а также в развитие региональных

проектов ГСНО, в частности, в Черном, Балтийском и дальневосточных морях. Работы, осуществляемые по подпрограмме «Создание Единой системы информации об обстановке в Мировом океане» (ЕСИМО) ФЦП «Мировой океан», тесным образом связаны с целями и задачами ГСНО.

Важной частью системы наблюдений об океане стала **Международная система предупреждения о волнах-цунами** в Тихом океане. После землетрясений в Чили в 1960 г. и на Аляске в 1964-м МОК организовала сразу два новых органа: **Международную группу по координации систем оповещения о цунами в Тихом океане** (МГК/СОЦТ – ICG/ITSU) и **Международный центр информации о цунами** (МЦИЦ – ITIC). Цунами 2004 г. заставило организовать подобную систему и в Индийский океане. В 2006 г. были проведены первые международные учения службы оповещения о цунами в Тихом океане, в которых участвовал и Центр цунами в Южно-Сахалинске.

ВМО в 1986 г. инициировала создание **Глобального банка цифровых данных по морскому льду** (ГБЦДМЛ – GDSIDB) для поддержки Всемирной программы изучения климата. Ледовыми службами девяти стран выполняется подготовка и представление исторических данных по морскому льду Арктики и Антарктики. Важную роль в проекте играет Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт Роскомгидромета.

В рамках ВМО создана также сеть сбора данных о загрязнении в открытом море – **Система поддержки операций по реагированию на аварийное загрязнение моря** (СПОРАЗМ – MPERSS). Вся акватория Мирового океана разделена на 16 районов, за информацию в которых отвечает какая-либо страна. России достался арктический район к северу от территориальных вод между 20° в. д. и 170° з. д.

2.10.4. Ведущие национальные программы России и США по исследованию Мирового океана в XXI веке

По решению Организации Объединенных Наций 1998 год был объявлен Международным годом Мирового океана. В этой связи многие страны мирового сообщества разработали программы исследования и развития своих прибрежных вод, а также более широкого освоения ресурсов Мирового океана.

10 августа 1998 г. специальным постановлением правительства Российской Федерации была утверждена федеральная целевая программа **«Мировой океан»**. Основными ее разработчиками были 12 ведущих НИИ России, а главная цель – эффективное использование ресурсов и пространства Мирового океана в интересах экономического развития, обеспечения безопасности страны и охраны ее морских границ.

Реализация программы рассчитана на 15 лет – до 2012 г. Комплекс ее проблем включает: международно-правовые, торговые, промышленные, транспортные, научные, военно-стратегические. На заклю-

чительном этапе реализации программы (2007–2012 гг.) предполагается формирование новой структуры морской деятельности во всех указанных сферах, отвечающей нуждам будущей стратегии как внутреннего развития страны, так и ее положения в мире.

2 сентября 1999 г. на специальной конференции в Монтере (Калифорния) вице-президент Соединенных Штатов Америки Альберт Гор доложил проект исследования Мирового океана США – **«Повернемся к морю: Будущее Америки в Мировом океане»**. Проект предусматривает проведение 150 поддерживаемых государством мероприятий по 25 научным направлениям, включающим защиту, восстановление, а также изучение океанских ресурсов США. Основу проекта составляет понимание жизненно важного значения ресурсов океана в будущем американской экономики, безопасности страны, здоровья и благосостояния ее народа. Нетрудно убедиться в том, что цели создания этих двух крупнейших национальных проектов XXI века практически совпадают. Тем не менее основные принципы, которые Россия и США ставят в основу достижения этих целей, существенно отличаются.

В российской программе основной акцент направлен не только на исследование и охрану морской среды, но и на активизацию деятельности по освоению ресурсов Мирового океана. Американцы же озабочены в большей степени «выживанием» в условиях катастрофических изменений морской среды на побережье своей страны. Об этом свидетельствуют существенные различия в направлениях деятельности двух стран в XXI веке по исследованию Мирового океана, запланированных в национальных программах (табл. 2.13).

Таблица 2.13.

Основные направления деятельности России и США в рамках национальных программ исследования Мирового океана в XXI веке

НАПРАВЛЕНИЕ	
РОССИЯ	США
1. Международно-правовые вопросы и их политический аспект	1. Морской транзит (транспорт): эффективность морских перевозок, безопасность судоходства, управление, гидрометеорологическое обеспечение, экологическая безопасность
2. Исследование природы Мирового океана: ключевые процессы, среда и ресурсный потенциал шельфа, мониторинг среды, динамика экосистем и биоресурсов, океаническая земная кора, механизмы природных катаклизмов, навигация, загрязнение	2. Прибрежный туризм
3. Военно-стратегические интересы России в Мировом океане	3. Прибрежные поселения: защита от природных катаклизмов, использование земель, коммунальные сбросы в море загрязнений

Продолжение табл. 2.13.

НАПРАВЛЕНИЕ	
РОССИЯ	США
4. Минеральные ресурсы Мирового океана, Арктики и Антарктики	4. Внутреннее рыболовство: оценка запасов, рациональность промысла, рыбоохрана, восстановление запасов
5. Создание технологий для освоения ресурсов и пространств Мирового океана	5. Международное рыболовство, аквакультура, биотехнологии
6. Использование биологических ресурсов Мирового океана	6. Коралловые рифы, эстуарии рек, морские национальные парки
7. Транспортные коммуникации России в Мировом океане	7. Свобода судоходства: национальная и экономическая безопасность США
8. Освоение и использование Арктики	8. Шельфовая нефть и газ
9. Изучение и исследование Антарктики	9. Охраняемые виды морской фауны
10. Создание единой системы информации об обстановке в Мировом океане	10. Затопленные ресурсы: охрана, восстановление, хранение исторических памятников
11. Создание высокотехнологических установок, машин и оборудования для морской добычи нефти, газа и освоения углеводородных месторождений на континентальном шельфе Арктики	11. Присоединение к Конвенции ООН по морскому праву, внедрение законов морского права: предупреждение опасностей и угроз на море
12. Мероприятия государственного заказчика-координатора	12. Фауна океана и прибрежных вод: изменение, охрана, восстановление запасов и структуры популяций
	13. Нетрадиционные обитатели – нововселенцы
	14. Морские обломки и мусор, качество воды
	15. Образование океанологов, океанологические знания
	16. Система наблюдений Мирового океана
	17. Океанские и прибрежные исследования: минеральные ресурсы, малоизученные формы жизни глубоководных районов, дистанционные методы изучения океанских глубин

Анализируя таблицу 2.13, легко заметить преобладание в американской программе, по сравнению с российской, природоох-

ранных направлений и более подробную их детализацию.

При этом также очевидна весьма узкая направленность (глубоководные районы) в ней планов в области океанских и прибрежных исследований. В то же время в российской программе в отличие от американской отсутствуют блоки «прибрежный туризм», «образование океанологов» и «океанологические знания».

Вопросы

1. Способы использования природных вод человеком.
2. География и структура мирового водопользования (основные страны-водопотребители).
3. Основные этапы гидротехнического строительства в России.
4. География водохранилищ мира.
5. Последствия зарегулирования и безвозвратного изъятия речного стока.
6. Суть и причины Аральского кризиса.
7. Количественные критерии антропогенной нагрузки на водные ресурсы водосборных бассейнов и их изменчивость по странам мира.
8. Показатели качества морских вод.
9. Основные количественные критерии качества природных вод.
10. Формы реакции морских экосистем на антропогенные изменения водных ресурсов водосборов.
11. Механизмы реакции гидрологической, гидрохимической и биологической структуры морских вод на зарегулирование и изменение качественного состава речного стока. Эвтрофирование.
12. Механизм развития летней придонной гипоксии и анаэробных зон на северо-западном шельфе Черного моря.
13. Механизм снижения биологической продуктивности морских вод в результате зарегулирования и изменения качественного состава речного стока.
14. Какие годы считают началом вступления России в международное сотрудничество по изучению Мирового океана и почему?
15. Важнейшие международные программы исследования Мирового океана до середины XX века.
16. Основные современные направления международного сотрудничества в области исследования Мирового океана.
17. Особенности национальных программ России и США по исследованию Мирового океана.

Глава 3. ГЕОГРАФО-ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МОРСКОГО ВОДОЕМА

В начале 1980-х гг. в Киеве на представительном техническом совете, рассматривавшем вопрос о целесообразности и возможных последствиях строительства Днепровско-Бугского гидротехнического узла, мне довелось объяснять исполнителям задания – сотрудникам крупного проектного института, что ожидает Черное море в случае реализации очередного «проекта века». Я вдохновенно распространялся о десятках тонн мертвой рыбы, которая покроет в ближайшие годы пляжи Одессы и Очакова, о возрастающих объемах зловонных выбросов городской канализации, о гниющих водохранилищах и о многих других вероятных последствиях строительства на Днестре еще одной плотины. Несмотря на все мои эмоции, носовых платочков в зале не появилось. Аудитория отреагировала на информацию более чем спокойно. Дискуссия закончилась традиционным вопросом: почему ваша природа? Имелась в виду сумма компенсации за нанесенный природе ущерб.

Только спустя десятилетие, стало понятно, что причина фиаско моего доклада заключалась не в отсутствии убедительных аргументов, а в том, что приводимые факты не представляли единой цепочки причинно-следственных связей, которая позволила бы объединить слушателей с «объектом», показать их место в структуре связей цивилизации с природой. В то время выстроить такую логическую схему было просто невозможно из-за обилия и разнообразия информации при отсутствии способов ее систематизации, увязки, наглядного представления, а также сложности межведомственных отношений и стереотипов профессионального мышления.

Последующий анализ многочисленных попыток оценить состояние морских акваторий показал, что диагноз, а тем более прогноз состояния морских акваторий в конце XX века, оставались далекими от совершенства. В частности, например, несмотря на то, что на побережье и водосборе Черного моря в конце прошлого века располагалось и успешно функционировало более десятка НИИ и других организаций, занимавшихся изучением водоема, для объяснения причин развития с первой половины 70-х гг. на его северо-западном шельфе заморных явлений (массовой гибели донных гидробионтов) потребовалось пять лет. Так же «оперативно», несмотря на более чем 100-летнюю историю исследования Черного моря (в то время – «самого изученного»), только после 10-летнего экспедиционного и мозгового «штурма» была наконец научно обоснована нереальность выхода на поверхность и возгорания сероводорода в его открытой части. Это

позволило в 1990-х гг. отклонить авантюрный проект «спасения» населения причерноморских стран и самого моря от предполагаемой катастрофы посредством строительства в Новороссийске гигантского энергетического комплекса по добыче из глубин и переработке этого газа.

Одна из основных причин наличия «белых пятен» в области диагноза и прогноза состояния морских акваторий – *отсутствие методических разработок для систематизации многоплановой морской экологической информации, ее наглядного представления и оперативного доведения до потенциальных потребителей.*

В начале 1990-х гг. в России стали активно разрабатываться концепции развития отдельных элементов системного подхода к исследованию морских водоемов. «Антропогенная экология океана» рассматривает биологические аспекты проблемы «антропогенное воздействие – морская экосистема». «Геологическая экология океана» исследует «механизмы разрушения биосферы через влияние человека на рельеф, осадки и взвешенное вещество». В «Основах гидроэкологии» больше внимания уделяется общим вопросам и понятиям, отражающим причинно-следственные связи «среда–объект» в водной (в основном в пресноводной) экосистеме. «Научные основы мониторинга качества вод» рассматривают организационные и методические вопросы зарубежных и отечественных исследований качества поверхностных вод суши, теоретические аспекты моделирования механизмов его изменения, а также проблемы нормирования экологических нагрузок вод различными видами загрязняющих веществ. В «Геоэкологических исследованиях ландшафтов морских мелководий» предлагаются принципы районирования и классификации подводных ландшафтов, концепция оценки устойчивости и механизмов динамики их природно-ресурсного потенциала под влиянием природных и антропогенных факторов.

Авторы перечисленных современных концепций исследования морских экосистем предлагают принципы систематизации лишь отдельных видов гидроэкологической информации, исследуют важные, но тем не менее весьма узкие профессиональные стороны проблемы.

3.1. Морская экологическая информация

В соответствии с методологическими принципами географо-экологического моделирования сведения, необходимые для оценки состояния морской экосистемы и решения практических задач морской экологии, состоят из данных о факторах воздействия на водоем (природных и антропогенных), действующих на его акватории и водосборе, а также информации о реакции на них условий среды и гидробионтов (рис. 3.1).

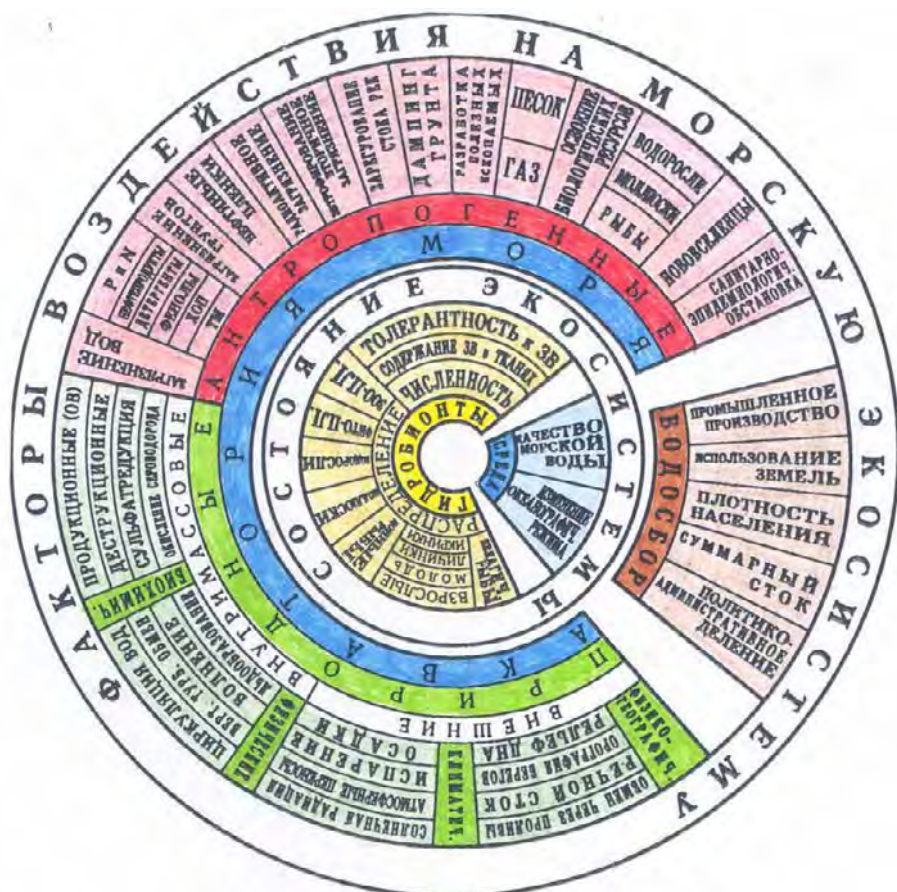


Рис. 3.1. Информационная база географо-экологического исследования состояния морской экосистемы.

История изучения большинства внутренних и окраинных морей Мирового океана насчитывает чаще всего десятки, а иногда и более сотни лет. В различных разделах естествознания, таким образом, накоплено колоссальное количество информации о закономерностях функционирования отдельных элементов морских экосистем. Способы получения и обобщения всех этих данных в значительной степени отличаются, что определяет особенности качества составных компонент представленной на рис. 3.1 «информационной мишени» морской экосистемы. К наиболее характерным из них относятся:

1. Различная обеспеченность данными прибрежных и открытых районов моря – большая их часть закономерно относится к более динамичным шельфовым зонам водоемов.
2. Значительная в большинстве случаев дискретность (точечность) во времени и пространстве наблюдений.
3. Различные регулярность, характер (объем, структура) наблю-

дений, а также методические приемы получения информации, зависящие от профессиональных интересов, способностей и ведомственной принадлежности исполнителей.

4. Многообразие факторов внешнего воздействия и, как следствие, значительная пространственно-временная изменчивость, сложно предсказуемая, опосредованная и неоднозначная ответная реакция моря, недоступная для понимания без исследования механизмов функционирования его экосистемы.

5. Наличие третьей ординаты (глубины) в условиях водной среды определяет существенные различия по вертикали в характере и интенсивности одних и тех же внешних импульсов и, соответственно, реакции абиотических и биотических компонент морской экосистемы на внешние воздействия.

6. Эпизодичность и непродолжительность многих природных и антропогенных воздействий определяет кратковременность развития их негативных для моря последствий, которые могут не фиксироваться без наличия непрерывной системы контроля.

7. Однородность природной среды (только водная), упрощающая на первый взгляд привязку экологической информации, в действительности существенно ее усложняет из-за высокой динамичности внутримассовых процессов (структура циркуляции, волнение, перемешивание и др.).

8. Особенности морфометрии каждого водоема (орография берегов, рельеф дна) определяют существенную пространственную изменчивость реакции водной среды на один и тот же внешний импульс.

9. Экологические характеристики в водоеме в значительной степени зависят от характера развития природных и антропогенных процессов за его пределами и нередко даже у границ соответствующего водосбора.

10. Уровень обобщения и точность данных различных областей морских наук существенным образом отличаются:

- специфика жизнедеятельности морских гидробионтов определяет традиционность количественного обобщения биологической информации (оценка запасов, биомассы, урожайности и т. д.) в масштабе всего водоема. Только для прикрепленных организмов (моллюски, водоросли) или донных видов рыб эти характеристики иногда дифференцируются по районам моря. Кроме того, такие оценки выполняются после биологических съемок только в характерные для гидробионтов периоды (нереста, нагула, зимовки);

- существовавшая до 90-х гг. система наблюдений за условиями среды (стационарная сеть прибрежных морских станций, сетка станций стандартных разрезов и экологических полигонов) определяла сравнительно большую регулярность получения данных (ежесуточные, ежесезонные) и, следовательно, пространственную обеспеченность водоемов этим видом информации, что позволяло делать более детальные выводы о состоянии режима как прибрежных, так и открытых их районов;

- показатели химического загрязнения вод и донных осадков в прибрежной зоне (в районах наблюдений гидрометеорологической службы) фиксировались довольно регулярно, но только в масштабе микросъемок (например, акватория порта или залива). Уже в трех-пяти милях (пять-восемь км) от берега эта информация (по экспедиционным данным) распространения не имеет. В открытой же части водоема, а также в районах расположения морских источников загрязнения (буровые платформы, свалки грунта, зоны добычи песка) наблюдения за показателями загрязнения вод велись эпизодически и до настоящего времени системы не представляют;

- исследования загрязнения морей пленками нефтепродуктов имеют весьма различную повторяемость (от одной съемки в год для морей Северного Ледовитого океана до 24 ежегодных облетов для Балтийского моря);

- выводы о состоянии загрязнения грунтов в открытых районах шельфа морей, базирующиеся на материалах нерегулярных полевых наблюдений институтов АН, министерств геологии, рыбного хозяйства и других ведомств, могут быть достоверными, но при условии указания в каждом конкретном случае точного места отбора проб;

- контроль за токсикологической обстановкой в море представляется набором случайных, нерегулярных выборок данных (от одного до нескольких десятков анализов), полученных на гидробионтах, выловленных чаще всего в зоне шельфа прибрежными орудиями лова (ставные невода, сети), в наиболее удобных для аналитиков местах. Системы же массовых определений токсикологических показателей из промысловых уловов, а следовательно, и получения статистически достоверных данных до настоящего времени не существует;

- несмотря на фрагментарность морской палеоэкологической и палеогеографической информации, она, тем не менее, дает возможность проследить эволюцию палеобассейнов на протяжении миллионов лет и реконструировать ее на перспективу.

Указанные обстоятельства определяют современный (весьма разноточный) уровень качества морской экологической информации, наличие «белых пятен» в соответствующем разделе географической науки, связанном с ее систематизацией, а также необходимость критического отношения к выводам и заключениям, получаемым в результате ее анализа.

3.2. Традиционные схемы систематизации морской экологической информации

Формирование экологической обстановки в море происходит под влиянием сложного комплекса взаимодействующих природных и

антропогенных процессов. Реакция морской экосистемы на внешний импульс, таким образом, оказывается в значительной степени опосредованной и неоднозначной. В этих обстоятельствах:

- результаты отдельно выполненных исследований в различных областях морской науки, объединенные по традиции в профессиональные или комплексные монографии, для решения задач современной морской экологии трудно применимы. Экологически значимые выводы в монографиях первого типа чаще всего оказываются скрытыми за методическими подробностями, пространственными анализами и специфической терминологией, интересными и понятными только узкому кругу специалистов. Комплексность же в обобщениях второго типа представляется формальной, так как в статьях, составляющих такого рода публикации, рассматриваются обычно интересные и важные, но узкие профессиональные проблемы, недостаточно между собой увязанные;

- для периода накопления экологической информации классической формой ее обобщения (структура типичной комплексной монографии) была схема: физико-географические особенности водоема – гидрологический режим – гидрохимический режим – донные отложения – гидробиология – ихтиология. Первоочередное внимание при систематизации данных, таким образом, уделялось абиотическим характеристикам, выбрать из которых приоритетные при таком подходе было практически невозможно. Интегральным же показателем «здоровья» водоема является в первую очередь состояние популяций гидробионтов, исследования которого позволяют ранжировать факторы внешнего воздействия по своей экологической значимости;

- основу традиционных обобщений данных о состоянии абиотической части морской экосистемы составляли режимные показатели. Исследование же процессов, определяющих их формирование, структуру причинно-следственных связей в системе «внешнее воздействие – реакция морской среды – реакция гидробионтов», позволивших бы дать ответ на вопрос, почему происходят те или иные явления, оказывалось, таким образом, на втором плане;

- анализ экологического значения территории водосборного бассейна для экосистемы, например, Черного моря показал, что вклад загрязнения водоема в результате прямого сброса сточных вод предприятиями побережья сегодня оказывается соизмеримым с аналогичным эффектом от стока рек Дунай и Днепр. К таким же выводам приходят ведущие морские исследователи нашей страны, единодушно полагающие, что причины большинства морских экологических кризисов «лежат на берегу». Тем не менее при оценке состояния морских акваторий в диапазон анализируемой экологической информации данные по водосбору сегодня включаются в исключительных случаях;

- опыт решения конкретных экологических задач в Черном море свидетельствует о том, что в современных обстоятельствах результаты одного-двух тщательно спланированных (с учетом

анализа возможных механизмов развития кризисов), направленных натурных экспериментов оказываются значительно более эффективными, чем традиционные многолетние массовые стандартные наблюдения;

- несмотря на высокий современный уровень развития математических методов и наличие множества примеров их использования в естествознании в прогностических целях, достаточно адекватной модели морской экосистемы до настоящего времени не существует. Фактографическая же информация оказывается пригодной только для статистических расчетов, выявления тенденций в изменении тех или иных показателей. Механическое ее применение в имитационных моделях без понимания законов природы практического (прогностического) результата, таким образом, не дает.

3.3. Географо-экологические принципы систематизации морской информации

Объективным законом развития естествознания является смена двух этапов: преимущественного накопления информации и этапа ее комплексного анализа, обобщения, систематизации. С первой половины 90-х гг. отечественная океанология оказалась на пороге такого качественного скачка. Существенными катализаторами этого стали субъективные обстоятельства современности – резкое сокращение объемов экспедиционных исследований и возникновение необходимости решения принципиально новых экологических задач в условиях сложной экономической ситуации.

В сложившейся ситуации наиболее приемлемым методологическим принципом систематизации и наглядного представления морской экологической информации представляется географо-экологический подход в рамках которого:

- море рассматривается как единая гидродинамическая система, неразрывно связанная с прилегающими территориями водосборного бассейна;

- оценивается пространственно-временная изменчивость основных природных и антропогенных факторов, воздействующих на морскую экосистему;

- учитывается аналогичная изменчивость причинно-следственных связей «внешнее воздействие – условия морской среды – состояние популяций морских организмов»;

- прослеживается пространственно-временная связь эволюции морских палеобассейнов с их современным экологическим состоянием и динамикой.

Основные положения такого подхода состоят в следующем:

- параллельно с традиционными приемами систематизации экологической морской информации методология ее современ-

ного обобщения строится на базе *географо-экологической информационной модели-«портрета»* моря, представляющей комплекс экологически значимых аспектов-«изюминок» изучения водоема различными науками, а также гидролого-климатических, административно-территориальных и производственно-хозяйственных особенностей территорий водосборного бассейна;

- при составлении модели-«портрета» водоема выделение приоритетных, экологически значимых факторов внешнего воздействия и факторов-индикаторов, определяющих устойчивость и состояние морской экосистемы, осуществляется с помощью биотических показателей, анализ которых в отличие от традиционного подхода выполняется перед анализом физико-географических особенностей водоема;

- в результате анализа биологических данных на основании исследования распределения основных промысловых гидробионтов и объектов их питания на акватории моря выделяются «центры сгущения жизни», представляющие в экологическом плане районы, наиболее уязвимые к внешним воздействиям;

- параллельно с анализом биологической информации осуществляется систематизация данных о толерантности морских организмов к воздействию загрязняющих веществ и признаках их интоксикации;

- анализ факторов природного воздействия на морскую экосистему проводится не по режимным показателям, а на основании исследования *процессов*, определяющая экологическая значимость которых была установлена в ходе систематизации биологических данных (характеристики режима при этом используются только для оценки реакции условий среды на внешнее воздействие);

- составной частью географо-экологической информационной модели- «портрета» водоема является информация о формах и интенсивности хозяйственной деятельности на морской акватории, их пространственном и временном распределении;

- в диапазон анализируемых факторов, определяющих состояние морской экосистемы, наряду с природными и антропогенными, действующими на акватории водоема, включаются также экологически значимые для моря особенности территории водосборного бассейна;

- географо-экологическая модель-«портрет» морской экосистемы, если исследуется весь внутренний или окраинный водоем, включает также информацию о смене его палеобассейнов в геологическом прошлом на основе ретроспективного анализа палеоэкологических и палеогеографических данных;

- содержание «портрета» моря (карты, диаграммы, таблицы, описания) служит основой для разработки природоохранных мероприятий, рекомендаций по управлению хозяйственной деятельностью, а также планов направленных натурных экспериментов с целью исследования механизмов кризисных явлений, происходящих в водоеме;

- на основании данных направленных натурных исследований планируется и осуществляется имитационный модельный эксперимент (розыгрыш сценариев изменения природных или антропогенных нагрузок) для оценки перспектив морских экологических эволюций.

3.4. Наглядное представление морских экологических данных и принципы экологического картографирования морских акваторий

Экологическое картографирование – относительно новое направление в тематической географии. Географический энциклопедический словарь, изданный в 1988 г., термина «экологическая карта» еще не содержит. Его рождение связано с возникновением необходимости системного изображения взаимоотношений биологических, социальных и техногенных (антропогенных) комплексов с природной (географической) оболочкой Земли и обеспечения общества наглядной экологической информацией.

В конце 80-х гг. на кафедре физической географии и картографии Харьковского государственного университета им. А. М. Горького была выполнена систематизация результатов картографирования охраны природы и использования природных ресурсов в нашей стране и за рубежом за период с 1945 по 1985 г. Результаты анализа 615 атласов различных типов (129 из них изданы в нашей стране) показали следующее:

- 1) в 227 зарубежных и 107 отечественных атласах природоохранная тематика отсутствовала;
- 2) в 33 из 95 стран, издававших атласы, природоохранная информация в их содержание не включалась;
- 3) до 1975 г. экологические показатели отображались в основном на тематических картах (физико-географических, туристических и др.). Издания только по охране природы встречались единично;
- 4) со второй половины 70-х гг. во все издававшиеся в нашей стране комплексные и тематические атласы стали включаться карты и разделы охраны природы и в том числе охраны вод;
- 5) среди почти 40 тыс. карт, содержащихся в проанализированных атласах (около 27 тыс. зарубежных и 12 тыс. отечественных), нет ни одной, содержащей информацию о состоянии морской экосистемы.

После указанного анализа авторами была построена структурно-логическая модель уровня картографирования показателей состояния, использования и охраны природных ресурсов за 40 лет. На фоне многоплановой экологической информации она включает сведения только о состоянии поверхностных вод суши. Данные по морским акваториям в указанную модель не заложены – в рассмотренный период времени они отсутствовали.

Аналогичный анализ картографических документов и материалов, изданных в нашей стране после 70-го г. (70 % из них – после 1985 г.), выполненный в Институте географии РАН, показал:

1) из семи признанных групп карт природоохранной тематики, изданных за этот период, почти половина отражает воздействие человека на природу, 15 % посвящена неблагоприятным и опасным природным процессам и явлениям, и только 9 % составляют комплексные экологические карты (КЭК);

2) 76 % КЭК изданы после 1989 г. и отражают состояние геосистем суши;

3) среди проанализированных картографических материалов не обнаружено ни одной карты, отражавшей бы экологическую обстановку в том или ином морском регионе России.

Авторы не имеют информации об издании в течение последних десяти лет морских экологических карт за рубежом.

По поводу такого положения дел в области комплексного экологического картографирования картографы Института географии РАН совершенно справедливо отмечали, что это «прямое следствие реальных теоретических, методологических и методических трудностей. ...еще не сложились надежные ... методики картографирования, так же как и методики изучения соответствующих проблем». В современной (2003 г.) монографии «Геоэкологическое картографирование» нет упоминаний о морских экологических картах.

Анализируя существующие подходы к составлению экологических карт, опыт разработки таких документов для геосистем суши, а также рассмотренную выше специфику морской экологической информации, можно сформулировать принципы экологического картографирования морских акваторий.

Морские экологические карты (МЭК) по своему характеру и назначению должны подразделяться на четыре группы: *ретроспективные (палеореконструкции), диагностические (аналитические и комплексные); прогностические (сценарные) и генеральные (синтетические).*

3.4.1. Ретроспективные карты палеогеографических реконструкций

Геологическая история любого морского водоема во многих случаях может быть ключом к пониманию причин современного состояния его экосистемы, оценки тенденций и перспективных изменений, в том числе и экологических. Так, например, согласно палеонтологическим реконструкциям, примерно 280 млн. л. назад подводная окраина (шельф) Единой Земли Пангеи, поднявшись над поверхностью океана, образовала северный материк Лавразию, отделенную от южного – Гондваны древним океаном Тетис (рис. 3.2). На завершающих этапах его развития в начале кайнозойской эры – поздний эоцен (45–35 млн. л. назад) южная окраина Лавразии в

районе современных бассейнов Средиземного, Черного и Каспийского морей представляла собой серию окраинных водоемов, отделенных от океана островами и островными дугами (рис. 3.2 а). Эта система была названа Перитетисом – периферия Тетиса.

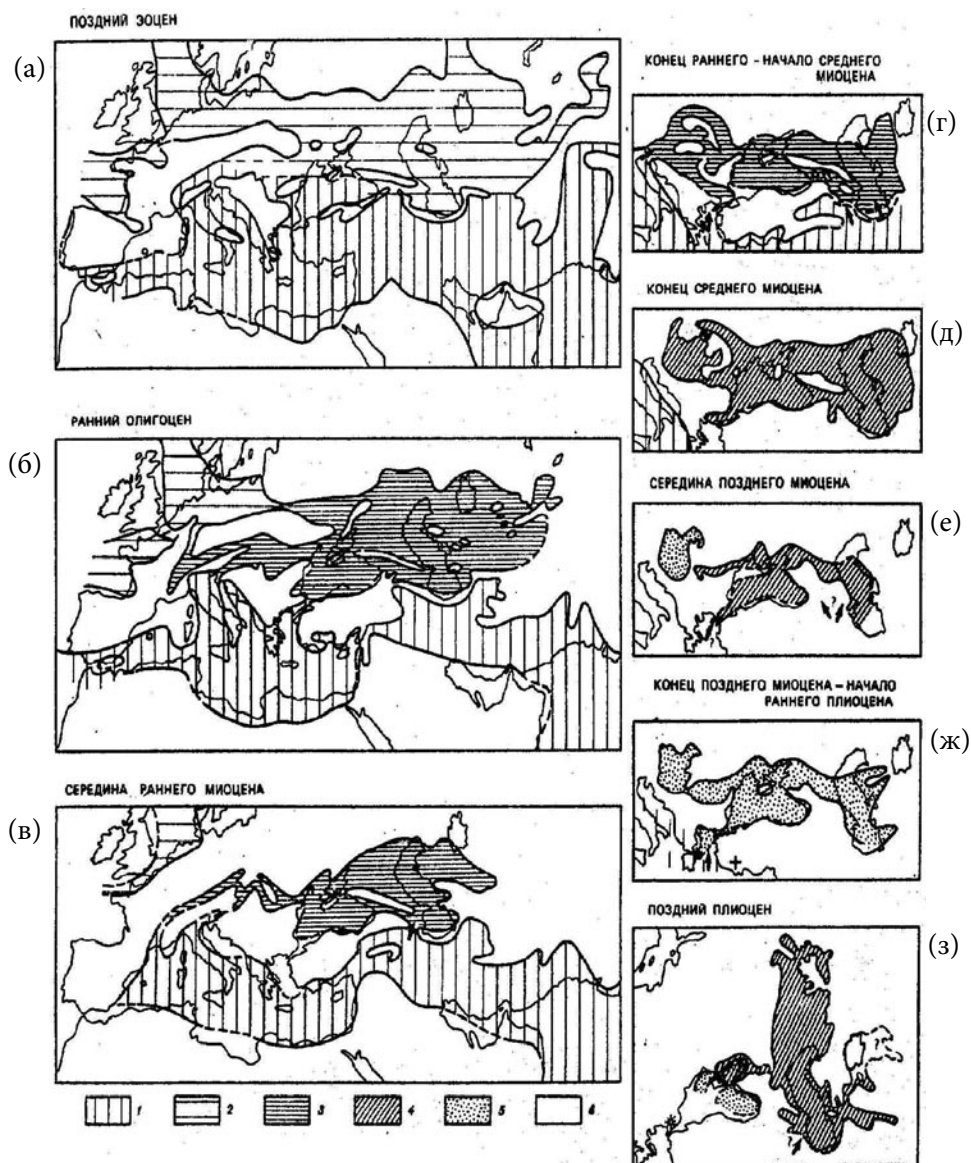


Рис. 3.2. Палеогеографические схемы Паратетиса и смежных бассейнов [Невеская и др., 1984]. 1 – Тетис и Средиземноморье; 2 – бореальные бассейны. Бассейн Паратетис: 3 – морской, 4 – полуморской, 5 – солоновато-водный; 6 – пресноводный. Стрелки – вероятное сообщение Паратетиса с открытыми морскими бассейнами.

В раннем олигоцене (35–30 млн. л. назад) под влиянием тектонических движений Альпийского пояса (альпийский орогенез), вызванных сближением континентальных плит Африки, Аравии и Индостана с Евразией, северная окраина Тетиса изолировалась от основного океана, образовав огромный внутриконтинентальный водоем Паратетис – параллельный Тетису. В широтном направлении он простирался между 40 и 50° с. ш. от северных предгорий Альп на западе до предгорий Тянь-Шаня (Ферганская долина) на востоке (рис. 3.2 б). По протяженности Паратетис превосходил современное Средиземное море в 1,5 (6 тыс. км), а по площади – не менее чем в два раза (3,4 млн. км²).

В течение последующих более чем 30 млн. лет (олигоцен, неоген) Паратетис переживал не менее семи циклов развития, в ходе которых прерывалась или возобновлялась его связь с Мировым океаном, а, следовательно, менялись соленость и видовой состав организмов.

I цикл. В начале своей истории (ранний олигоцен, 35–30 млн. л. назад) бассейн соединялся с Атлантикой через пролив, проходивший от Балтийского моря по территории Украины (рис. 3.2 б). Соленость моря была высокой, а в глубоководной части прогрессирующе развивались придонные сероводородные зоны.

II цикл. В конце раннего миоцена (20–16 млн. л. н.) Паратетис начал разделяться на Западный (Паннонский) и Восточный (Евксино-Каспийский) бассейны, из которых последний по размеру более чем в два раза превосходил своего собрата (рис. 3.2 в). На протяжении этого этапа связь Паратетиса с Мировым океаном (Атлантикой) сохранялась, соленость моря была близкой к океанической, а развитие сероводородных зон достигло максимума, что отразилось на фауне бассейна – для периода 25–20 млн. л. назад она неизвестна. В конце цикла водоем изолировался от океана и опреснился.

III цикл. В начале среднего миоцена (16–15 млн. л. назад) Паратетис окончательно разделился на Восточный и Западный. При этом первый бассейн продолжал изолироваться от вод Тетиса, а Западный сохранял с ним связь как на юго-западе (со Средиземноморьем), так и на юго-востоке (с Индо-Пацификой) через Восточное Средиземноморье – Закаспий, восточную Грузию (рис. 3.2 г). Третий цикл развития для Восточного Паратетиса закончился в конце среднего миоцена (13–12 млн. л. н.) **караганским** бассейном, полностью изолированным от океана, с более низкой, чем морская, соленостью.

IV цикл. 12–11 млн. л. н. Восточный Паратетис вновь ненадолго связывался с океаном (через восточную Турцию или Иран). Его соленость в этот **конкский** период повысилась до океанической, и бассейн заселили эвригалинные виды организмов. Изменялись очертания берегов, активно шел процесс образования новых эндемичных и специфических видов.

После этого 11–10 млн. л. н. связь Западного Паратетиса с оке-

аном прекратилась, и он трансформировался в серию пресноводных и соленоводных бассейнов. Оставшийся же на месте Восточного Паратетиса огромный (от Карпат до Туркмении) полузамкнутый **сарматский** бассейн периодически соединялся со Средиземноморьем (рис. 3.2 д). Его соленость в течение всего периода понижалась (до 3–4 ‰), что привело к исчезновению в конце концов (9–8 млн. лет назад) морских организмов.

V цикл. В середине позднего миоцена (7 млн. л. н.) наступил **меотический** этап развития Паратетиса, связанный с новой морской трансгрессией. Полагают, что в это время он контактировал со Средиземноморьем через Евфратский пролив, названный так А. Л. Чепалыгой, первым обнаружившим его ископаемые признаки на территории современной Восточной Турции. Другой вариант сообщения Восточного Паратетиса со Средиземноморьем в это время – через районы Македонии, Фракии и европейской Турции (рис. 3.2 е).

VI цикл. В конце позднего миоцена – начале раннего плиоцена (6–5 млн. л. назад) после очередной трансгрессии Паратетис превратился в солоновато-водный **раннепонтический** бассейн, состоявший из ряда отдельных водоемов: Паннонского, Дакийского, Эвксинского, Каспийского и Эгейского (рис. 3.2 ж).

В начале позднего плиоцена (3,5 млн. л. назад) Эвксинский бассейн, пройдя несколько стадий, стал основой современного Черного моря. В восточной части Паратетиса море ушло в пределы современных среднего и южного Каспия, потеряло связь с Эвксинским бассейном и образовало бассейн будущего Каспия. На первом этапе его развития это была только южная котловина, в которую впадали реки Волга, Самура, Кура, Узбой. Водоем был практически пресным с огромным слоем дельтовых отложений «продуктивной толщи», которые за миллионы лет захоронили в своих слоях колоссальные скопления нефти.

VII цикл. В верхнем плиоцене (~3,5–1,8 млн. лет назад) Прикаспийская область опустилась и воды молодого каспийского бассейна распространились в основном на север, образовав акчагыльский бассейн, отличавшийся довольно высокой соленостью океанического типа в результате, как полагают авторы, его связи со Средиземноморьем через уже упоминавшийся Евфратский пролив (рис. 3.2 з).

В четвертичное время (последние 1,8 млн. лет) трансформация бассейнов южных морей продолжалась. В Черном море, например, максимально колебались температура, соленость и видовой состав населения, а уровень изменялся незначительно – площадь водоема оставалась практически постоянной. Соленость же водоема изменялась от 2–4 ‰ (Новоэвксинское море-озеро) до 30 ‰ (Карангатский бассейн).

В Каспийском скачки солености были меньшими (не более 6–8 ‰), а изменения уровня – более существенными. В результате его периодических колебаний, происходивших под влия-

нием тектонических процессов и смены климата, связь между водоемами и со Средиземноморьем через проливы Босфор и Маныч часто нарушалась, а площадь водоема периодически то увеличивались, то сокращалась. В период **хвалынской** трансгрессии, например (16–10 тыс. лет назад), уровень Каспийского моря поднялся на 170–190 м (относительно отметок предыдущей регрессии), а площадь затопления составила 750–800 тыс. км². Сформировавшееся в это время прохладное, солоновато-водное **раннехвалынское** море по площади достигало 950 тыс. км² – в три раза больше современной (рис. 3.3). Соленость моря изменялась от 6–7 до 11,5 ‰. Через Манычский пролив в Черное море сбрасывалось до 20–40 тыс. м³/с каспийской воды, температура моря с севера на юг менялась от 4 до 10° С.

С наступлением **мангышлакской** регрессии (9 тыс. лет назад) уровень моря понизился до минус 50, а на отдельных ее стадиях до минус 110 м абс. высоты. Связь позднехвалынского бассейна с Черным морем прекратилась. Древние уровни очередного **мангышлакского** водоема (рис. 3.3) обнаружены на современных глубинах 75–80 м. В бассейне устанавливается резко аридный сухой климат, а на побережье господствуют полупустыни и пустыни.

Характерной особенностью природы Каспийского моря в период голоцена (последние 20 тыс. лет) оказывается смена трансгрессионно-регрессионных периодов продолжительностью до 100 лет. При этом в моменты трансгрессий его площадь возрастала по сравнению с современной в 2,5 раза, а уровень повышался на 80 м выше современной отметки, достигая абсолютной отметки плюс 50 м. В период регрессий уровень моря опускался до отметок минус 150 м абс. высоты.

Включение в географо-экологическую модель морского водоема ретроспективных карт палеогеографических реконструкций границ его древних бассейнов необходимо для ориентирования исследователей и природопользователей и в современной обстановке. Так, положение уровня поверхности влияет на распределение в море площадей, занятых мелководьем (приустьевые участки), контуры его береговой черты, а также размеры и границы зон обитания промысловых гидробионтов и объектов их питания на разных стадиях биологического развития (нерест, нагул).

Во время пика (1930–1942 гг.) последней регрессии уровень Каспийского моря понижался на 20 см/год. С 1942 по 1970 г. в районе Баку море отступало на 150 м за десять лет, а площадь его акватории сократилась на 40 тыс. км². Во время пика (1979–1981) последней трансгрессии моря, длившейся 18 лет, скорость подъема его уровня достигала 30 см/год. Средняя скорость размыва и затопления берега в различных районах Дагестана в это время изменялась от 25 до 200 м/год. На побережье крупных городов было разрушено и затоплено много промышленных предприятий и строений, нарушена система канализации и водоснабжения. На низменной казахстанской части северного Каспия море наступало

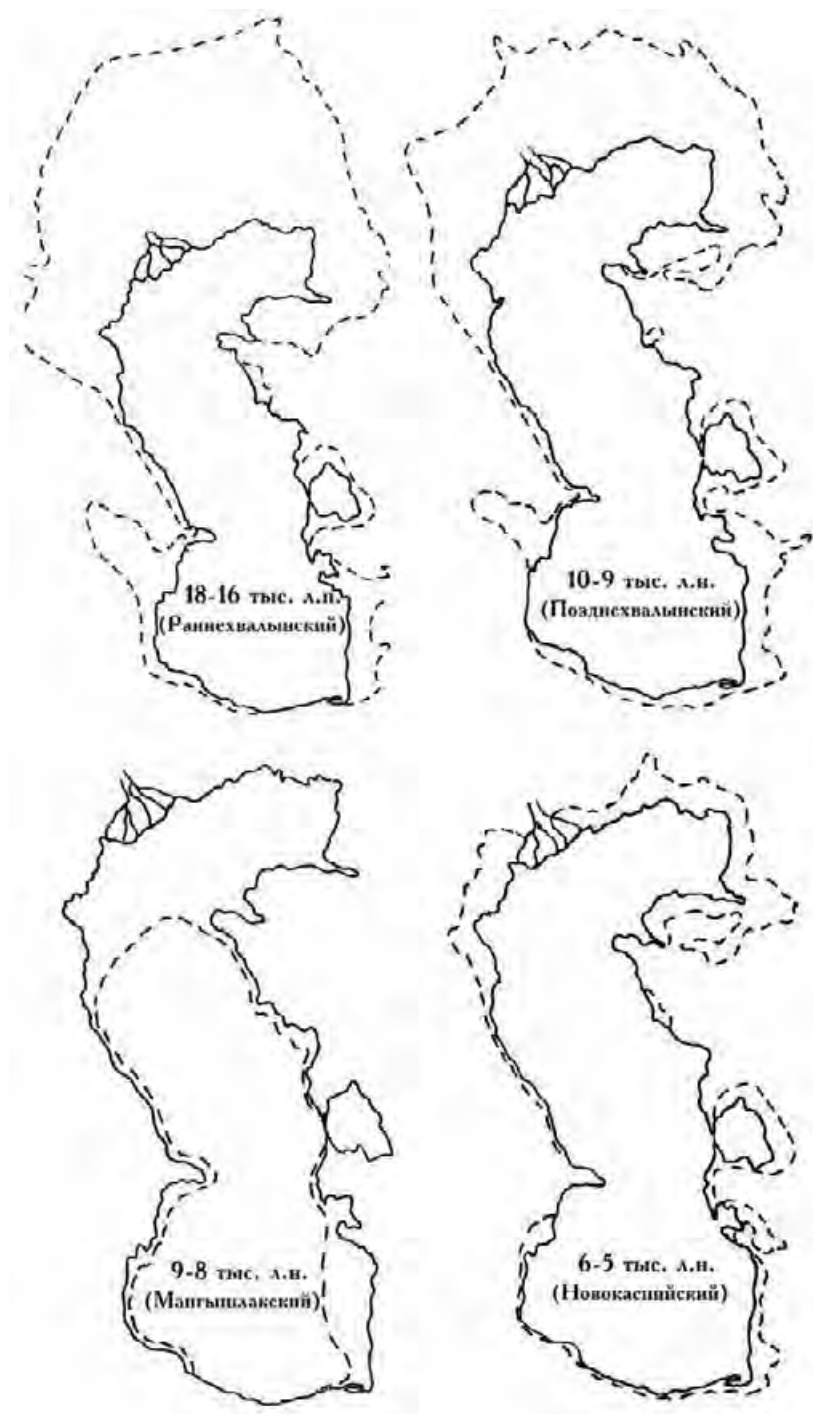


Рис. 3.3. Четвертичные палеобассейны Каспийского моря [Чепалыга, 2002]. Пунктир и сплошная линия – палео и современные границы водоема соответственно.

на сушу в полосе шириной 30 км, а по прибрежным поперечным ложбинам еще дальше. Особенно сложная ситуация складывалась в результате затопления участков, занятых объектами нефтегазодобывающего комплекса и сельского хозяйства. В прибрежных водах Дагестана содержание тяжелых металлов увеличилось в десятки раз, а микробиологическая загрязненность вод превысила нормы в 200 и более раз.

Всех этих проблем наверняка можно было бы избежать, будь природопользователи бассейна Каспийского моря знакомы с геологической историей водоема, информированы об особенностях его новейшей истории.

3.4.2. Диагностические морские экологические карты

Наглядным отражением негативной реакции условий среды и гидробионтов на внешние воздействия, а также характера и интенсивности этих импульсов могут служить *аналитические морские экологические карты* (АМЭК). При этом следует отметить, что набор причинно-следственных связей «антропогенное воздействие – негативная реакция экосистемы» весьма обширен, в то время, когда количество неблагоприятных для моря явлений, определяемых природными процессами, относительно невелико. Кроме того, отрицательная роль естественных факторов обычно оказывается или узколокализованной, или экспериментально не доказанной (хотя гипотетически не вызывает сомнения), или перекрывается мощным антропогенным прессом. Так, например, в Черном море:

- **апвеллинги и сгонно-нагонные явления**, развивающиеся под влиянием синоптических процессов у побережья Ялты, Одессы, Новороссийска, носят локальный характер, наблюдаются только в летний период, сохраняются непродолжительное время (менее недели), а их негативные последствия – снижение температуры воды на поверхности в прибрежной зоне сказываются в основном на системе рекреации в указанных местах и не распространяются на все побережье;

- **водообмен через Босфор и Керченский пролив** определяет поступление в водоем значительного количества загрязняющих веществ, безусловно влияющих на экологическую обстановку в водоеме, однако их дальнейшая судьба (за пределами предпроливных зон), а также режим процесса загрязнения остаются до настоящего времени неизвестными;

- **интенсивное волнение и льдообразование** гипотетически, безусловно, отрицательно сказываются на выживании гидробионтов на ранних стадиях онтогенеза (икринки, личинки) в зонах развития этих явлений, но конкретных оценок, подтверждающих эти факты количественно и пригодных для картографирования, пока не существует;

- **речной сток** в многоводные годы до начала интенсивной

хозяйственной деятельности, формируя зоны распреснения, периодически оказывался «спусковым» механизмом в цепочке причинно-следственных связей, развивавшихся на шельфе СЗЧМ (мелководье до глубин 25–40 м) в летнее время после паводков, включавшей: *формирование обширных зон распреснения → усиление плотностной стратификации → ослабление по этой причине аэрации придонного слоя вод → развитие в понижениях рельефа дефицита кислорода у дна → временный переход придонной гипоксии в локальных местах в анаэробные условия → локальную гибель и угнетение донных организмов*. В настоящее же время после включения в процесс развития заморов мощного антропогенного фактора (эвтрофирование и зарегулирование стока рек) выделить указанную отрицательную природную роль речного стока в этом процессе практически не представляется возможным;

- **поступление речных вод в море**, кроме распресняющего влияния и усиления вертикальных градиентов плотности, определяет формирование в СЗЧМ фронтальных зон со значительными горизонтальными градиентами солености. Этот процесс в весенне-летний сезон также оказывается «спусковым» в развитии еще одной цепочки причинно-следственных связей, приводящей к ухудшению условий среды. В качестве «передаточного» механизма при этом выступает внутримассовый фактор – синоптические вихревые образования (СВО). Весь комплекс связей реализуется следующим образом: *после паводка возрастают горизонтальные градиенты солености (плотности) → теряется устойчивость струи основного черноморского течения → интенсифицируется процесс вихреобразования с прибрежной стороны ОЧТ → вдоль свала глубин шельфа развиваются антициклонические круговороты → на их периферии происходят подъем глубинных, обедненных кислородом вод и адвекция их на шельф в зону промысловых изобат → на глубинах 70–100 м изменяется характер поведения промысловых скоплений шпрота (распад, отрыв от грунта) → нарушается система поиска и добычи рыбы*. В то же время в процессе генерации СВО в указанном районе, кроме речного стока, участвуют и другие природные факторы (орография берегов, синоптические ситуации над морской акваторией). В этих обстоятельствах выделить отрицательную роль речного стока в чистом виде весьма затруднительно;

- **синоптические процессы**, оказываясь «спусковым» механизмом, вызывают в осенне-зимний период еще один комплекс явлений, заканчивающийся ухудшением условий среды в водоеме. «Передаточным» звеном при этом служит процесс развития квазистационарных циклонических круговоротов в открытой части моря. Вся цепочка экологических связей выглядит следующим образом: *интенсификация циклонической деятельности над акваторией моря → интенсификация квазистационарных циклонических круговоротов в открытой части моря → усиление в их центрах восходящих движений вод → подъем глубинной гипоксии*

в фотический слой до 50 м и выше → снижение здесь концентрации кислорода до двух и менее мл/л вплоть до выхода глубинной гипоксии на поверхность. Гипотетически можно предложить, что результаты последнего этапа развития указанного комплекса причинно-следственных связей отрицательно отражаются на жизнедеятельности холодолюбивых форм кормового зоопланктона, обитающих на этих горизонтах, но конкретных доказательств этого пока не получено.

Указанные обстоятельства определяют тот факт, что более актуальным и корректным в настоящее время представляется составление АМЭК, отражающих в первую очередь неблагоприятные для водоемов последствия развития хозяйственной деятельности на их акваториях и водосборах. При этом:

- многочисленность внешних антропогенных импульсов и возникающих под их влиянием причинно-следственных связей в морской экосистеме определяет тот факт, что количество АМЭК зависит от конкретного водоема и может изменяться по мере совершенствования наших знаний о его природе, характере и интенсивности антропогенных нагрузок;

- АМЭК может представлять экстремальные случаи развития в море негативных явлений с указанием в легенде механизма их развития и масштабов на промежуточных этапах;

- любая аналитическая морская карта должна иметь точное название, содержащее информацию о том, какие связи и каких организмов или условий среды, с какими внешними воздействиями она отражает, а также ссылку на авторов представленной на ней информации.

Некоторые аналитические диагностические АМЭК, отражающие как природные экологически значимые обстоятельства в Черном море, так и негативные последствия хозяйственной деятельности на акватории водоема, включены в его географо-экологическую информационную модель-«портрет» и представлены для примера на рис. 3.4–3.13.

Карты распределения центров «сгущения» жизни. Благополучие морской экосистемы определяется состоянием популяций населяющих ее гидробионтов. Для ответа на вопрос: как отразится на состоянии популяций промысловых организмов и объектов их питания изменение условий среды в том или ином районе водоема, прежде всего, необходимо знание роли различных его участков в формировании численности популяций этих организмов. Это, в свою очередь, предполагает установление районов их массового скопления на разных стадиях биологического развития или центров «сгущения» жизни. В экологическом плане такой анализ можно интерпретировать как выделение на акватории моря зон повышенной «уязвимости» промысловых гидробионтов и объектов их питания к внешним воздействиям.

По этой причине на следующем после анализа палеогеографической информации этапе создания географо-экологической модели-

«портрета» морского водоема систематизируются биологические данные. Наглядным представлением результатов такого анализа служат аналитические морские карты распределения центров «сгущения» жизни в морском водоеме.

За многолетнюю историю изучения сырьевых ресурсов, например, Черного моря, у исследователей сложились определенные представления о поведении, характере распределения и динамике численности обитающих в водоеме гидробионтов, их реакции на внешние воздействия. Эти знания нашли свое отражение в проанализированных многочисленных итоговых монографиях, диссертациях и отдельных публикациях.

Оказалось, что наряду с огромным количеством накопленной информации, касающейся указанных аспектов жизни моря, в результате этих исследований было построено более 160 карт ежегодного распределения основных пелагических промысловых рыб Черного моря на разных стадиях онтогенеза за период 1981–1991 гг., составлены схемы жизненных циклов этих организмов, а также выделены районы обитания основных донных промысловых рыб, моллюсков и водорослей.

Тем не менее при решении конкретных экологических задач применение этих знаний на практике очень часто оказывается затруднено из-за их обилия, разнообразия и отсутствия должной систематизации, а распределение пелагических гидробионтов имеет значительную изменчивость, что делает ежегодные карты этого показателя малопригодными для применения в практических целях.

Наглядное представление указанной биологической информации и обобщение («сворачивание») соответствующих картографических материалов нами было произведено с помощью **интегрального индекса «сгущения» жизни (Life Concentration Index LCI)**, представляющего *сумму повторяемости величин повышенных концентраций исследуемых организмов в данном районе, отнесенную к количеству сочетаний их видов и биологических состояний*. Его математическое выражение имеет вид:

$$LCI = (1/N) \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n C_{i,j}, \quad (1)$$

где $C_{i,j}$ – повторяемость повышенных концентраций гидробионтов разных видов (i) в разных состояниях (j); n – количество видов гидробионтов; m – количество биологических состояний каждого организма; N – количество сочетаний n и m .

С помощью этого показателя была произведена статистическая обработка ежегодных карт распределения летне-нерестующих – хамса, ставрида (период 1981–1989 гг.) и зимне-нерестующих – шпрот, мерланг (период 1981–1991 гг.) видов рыб на разных стадиях онтогенеза (икринка, личинка, малек, взрослая особь), а также кормового зоопланктона в слое 0–100 м в летний и зимний сезоны 1985–1989 гг.

Таблица 3.1.

Интегральный индекс концентрации жизни (ИИКЖ) и его структура в Черном море

РАЙОН МОРЕЯ	ИИКЖ	Вклад (%) компонент в величину ИИКЖ				
	10²	ЗОО- ПЛАНКТОН	ИКРА	ЛИЧИНКИ	МОЛОДЬ	ВЗРОСЛЫЕ РЫБЫ
Взморье Дуная	36	Л Е Т О				
		13	21	10	22	34
Взморье Днестра	30	26	19	0	14	41
Евпатория	30	26	18	30	26	0
Открытая СВ часть	27	38	12	34	12	4
Туапсе	37	27	21	24	12	15
Сочи	41	24	28	19	13	16
Сухуми	43	18	26	16	26	16
Батуми	53	10	25	20	14	29
Взморье Дуная	34	З И М А				
		12	0	-	35	52
Свал глубин СЗЧМ	48	0	38	-	50	13
Алушта	52	8	35	-	38	19
Центр СВ части моря	48	21	38	-	41	0
Туапсе	56	18	32	-	43	4
Сочи	50	36	12	-	48	4
Центр ЮВ части моря	46	30	22	-	44	4

На каждой карте ежегодного распределения организмов выделялись участки повышенных концентраций – величин, в пределах распределения которых сосредоточено более 50 % численности рассматриваемых объектов. Для икринок шпрота, ставриды и хамсы их значения составили, соответственно, более 100, 5 и 10 экз./м². Для личинок ставриды и хамсы – более 1 экз./м², а для молоди шпрота, мерланга, ставриды и хамсы – более 1000, 10, 100 и 1000 экз. в улове за 30 минут траления соответственно. В распределении посленерестового стада шпрота и преднерестового стада хамсы и ставриды повышенными оказались концентрации более 1000, 700 и 10 экз. за 30 минут траления, а для кормового зоопланктона его содержание в воде – более 50 мг/м³.

После указанной обработки полученные ежегодные карты повышенных концентраций гидробионтов путем последовательного наложения для каждого объекта интегрировались в одну, на которой выделялись участки совпадений зон максимумов, подсчитывалось количество таких случаев на каждом участке и рассчитывалась их повторяемость (C_{ij}) за рассматриваемый период. Таким образом, набор карт ежегодного распределения каждого объекта объединяется в одну интегральную карту распределения повторяемости его повышенных концентраций в исследуемый период. Далее с полученных интегральных карт в узлах 0,5° сетки снимались значения (C_{ij}) для каждого гидробионта и рассчитывался интегральный индекс «скопления» жизни по формуле (1). Зоны максимальных его значений соответствуют центрам наиболее устойчивых во времени скоплений гидробионтов, а удельный вес каждого организма в величине LCI легко рассчитать по простой пропорции и вывести на карту в виде диаграммы. Примеры такого расчета для Черного моря представлены в табл. 3.1 и на рис. 3.4.

Введение понятия «центр «сгущения» жизни», расчет и картографирование соответствующего индекса позволили объединить около 160 карт распределения основных пелагических рыб Черного моря на разных стадиях онтогенеза и кормового зоопланктона в две интегральные сезонные и 14 структурных (по каждому объекту и биологическому состоянию).

Наличие у исследователей и природопользователей таких карт параллельно с информацией о толерантности морских организмов к нефтяному и химическому загрязнению позволяет в случае катастрофического изменения условий среды в том или ином районе моря (разлив нефти, сброс токсикантов и др.) оперативно оценить, на каких видах организмов и в какой степени последствия катастрофы могут отразиться в первую очередь.

Карты распределения донных промысловых организмов

Районы обитания донных промысловых рыб, зоны их нереста и нагула, схемы жизненных циклов в большинстве районов Мирового океана практически стационарны и хорошо изучены. Карты типичного распределения и путей миграций донных промысловых организмов, например, в Черном море, позволяют выделить цент-

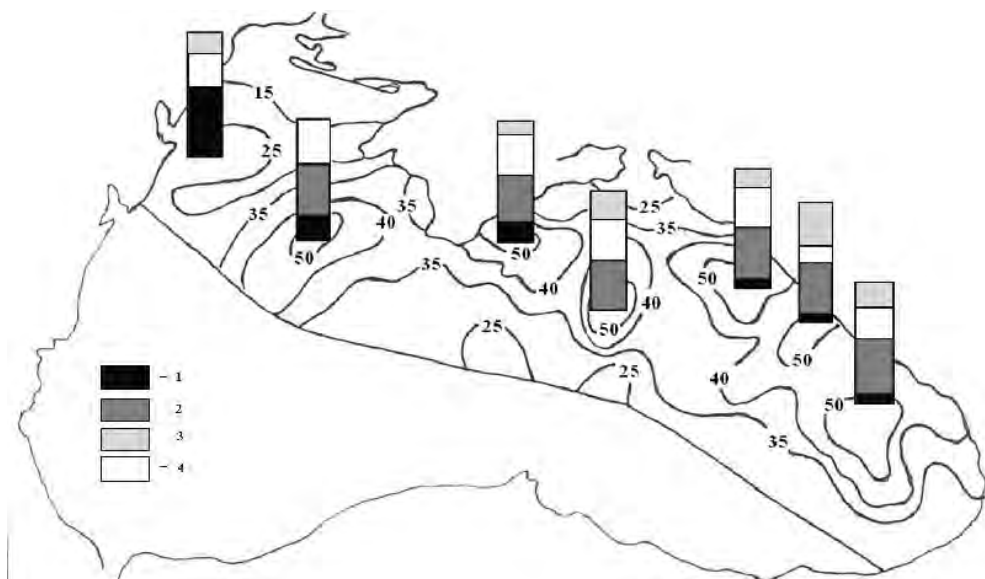


Рис. 3.4. Распределение центров концентрации жизни (изолинии) и их структура (диаграммы: 1 – взрослые рыбы, 2 – молодь, 3 – кормовой зоопланктон, 4 – икринки) в Черном море зимой за период 1980–1990 гг. [Фащук и др., 1995]. Цифры на изолиниях – повторяемость повышенных концентраций объекта за исследованный период.

ры концентрации жизни в бентали и районировать придонные участки акватории водоема по признаку их чувствительности к внешним воздействиям (рис. 3.5–3.6 например). Сводно-аналитическая таблица 3.2 включает результаты систематизации данных о характере поведения промысловых донных организмов и условиях их обитания.

В процессе наблюдений за состоянием популяций морских гидробионтов формировались ряды биологических характеристик (биомасс, запасов, урожайности и т. д.) и анализировались тенденции в их изменении. Однако, учитывая недостатки этих данных (нерегулярность наблюдений в начале исследований, короткий период регулярного контроля и др.), такой анализ может расцениваться только как экспертное заключение соответствующих специалистов, основанное на их знании законов развития популяций. Эта информация, представляющая безусловный интерес для народного хозяйства и природоохранных органов, тем не менее, не позволяет оперативно дать оценку состояния популяции морских организмов в конкретный момент времени, предполагающую наличие сравнения с каким-либо эталоном. Кроме того, ее современное представление (многочисленные графики и таблицы) затрудняет соответствующие восприятие и оценки.

**География жизненных циклов и оптимальные условия среды
для донных промысловых объектов Черного моря**

ОБЪЕКТ	СЕЗОН			
	ВЕСНА	ЛЕТО	ОСЕНЬ	ЗИМА
Водоросли	Пик развития (до 60 м, выше 10° С)	Развитие (от 10–15 до 40–60 м)	Пик развития (до 60 м, выше 10° С)	Развитие (от 10–15 до 40–60 м)
Моллюски	Нерест (10–40 м). Личинки в толще вод (8–13° С)	Развитие (10–40 м, ниже 24° С)	Нерест (10–40 м). Личинки в толще вод (8–13° С)	Развитие (10–40 м, выше 5° С)
Осетр	Нерест с мая в Днепре. Нагул на мелководье СЗЧМ	Нерест до июля в Днепре. Нагул на мелководье СЗЧМ	Нерест до сентября в Дунае. Нагул на мелководье СЗЧМ	Нерест с февраля в Дунае. Нагул на мелководье СЗЧМ
Севрюга	Нерест с марта в Дунае. Нагул на мелководье СЗЧМ	Нерест до июля в Дунае. Нагул на мелководье СЗЧМ	Нерест с сентября в Дунае. Нагул на мелководье СЗЧМ	Нерест до декабря в Дунае. Нагул на мелководье СЗЧМ
Белуга	Нерест до июня в Дунае. Нагул в Каркинитском заливе	Нагул в Каркинитском заливе	Нагул в Каркинитском заливе	Нерест с января. Нагул в Каркинитском заливе
Камбала	Нерест в прибрежной зоне Крыма (20–60 м, 8–12° С), март-июнь. Икра в толще вод	Нагул в зоне свала глубин шельфа Крыма (70–90 м). Молодь на глубинах 2–10 м	Нагул в прибрежной зоне Крыма (20–60 м)	Нагул в зоне свала глубин шельфа Крыма до 90 м
Кефаль	Нерест с мая по всему морю. Икра в толще вод до 100 миль от берега. Конец апреля (лобан), начало мая (сингиль) миграция для нагула в СЗЧМ и Азовское море	Нерест по август в прибрежной зоне. Молодь в июне-июле в лиманах, устьях рек	Миграция на зимовку с конца сентября (лобан) и начала октября (сингиль)	Зимовка в бухтах побережья Крыма (сингиль) и Сев. Кавказа (сингиль, лобан)

Для решения данной задачи предлагается использовать безразмерный интегральный критерий – индекс аномальности состояния биотической части морской экосистемы (АСБ), представляющий сумму нормированных по среднемуголетнему значению (W_0) аномалий (отклонений значения показателя (W) от его среднемуголетней величины) биологических показателей в конкретный год. Отношение аномалий к среднему берется по модулю, а знак аномалии учитывается при построении диаграммы.

Формула критерия, таким образом, имеет вид:

$$A = (1/N) \sum_{i=1}^N |(w-w_0)/w_0|, \quad (2)$$

где N – количество биологических показателей.

Следует отметить, что в уравнении (2) при необходимости и наличии информации расчет отклонений и нормирование могут выполняться по любому другому эталонному показателю (например, значению характеристики в определенный год до начала хозяйственной деятельности или средней ее величине за предшествующий отрезок времени и т. д.). Для ситуации Черного моря в качестве эталона использовано среднее значение показателей за период 1981–1990 гг., так как надежная аналогичная информация за предыдущие периоды имеется не по всем компонентам, а сравнение с более ранними послевоенными данными показало бы заведомо известную картину.

Таким образом, при использовании критерия АСБ мы получаем возможность объединить в один и наглядно представить несколько (количество не ограничено, а размерность не имеет значения) показателей, что в значительной степени облегчает оперативную оценку аномальности

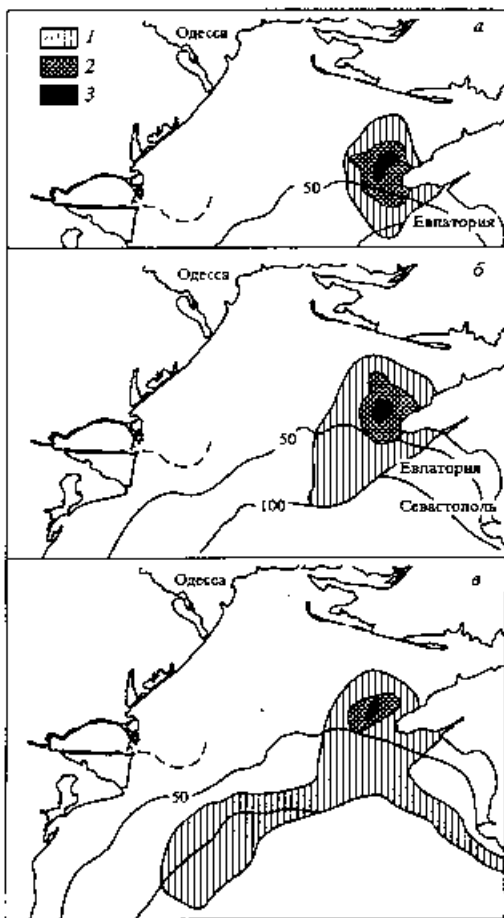


Рис. 3.5. Плотность концентраций (экз./час траления) русского осетра (а), севрюги (б) и белуги (в) в ноябре–марте. (1) – до 10, (2) – 11–100, (3) – более 100.

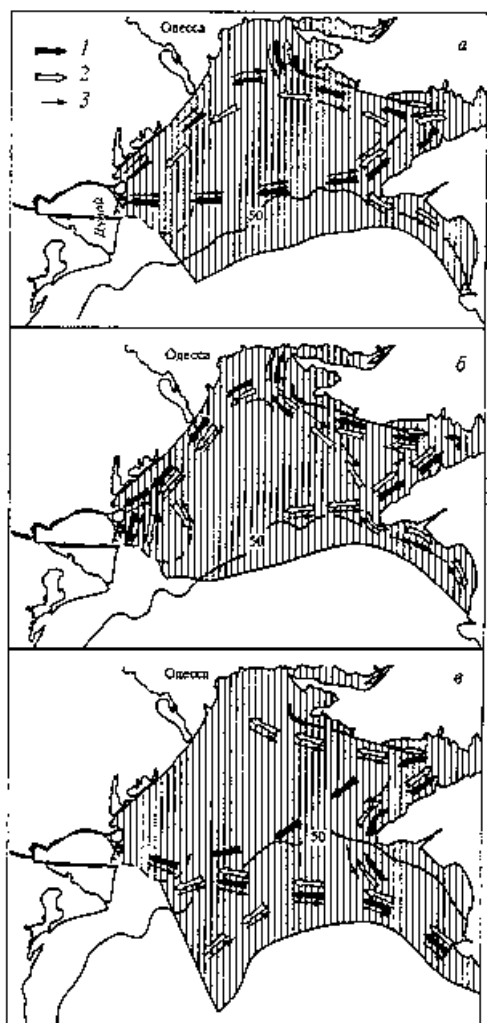


Рис. 3.6. Схемы миграций русского осетра (а), севрюги (б) и белуги (в) в апреле–октябре.
(1) – нерест, (2) – нагул,
(3) – обратные миграции.

бивых (41 %) и некормовых (47 %) форм зоопланктона, а в 1990-м – урожайность шпрота (36 %), мерланга (36 %) и биомассу калянуса (28 %).

Отрицательные аномалии преобладали в 1988 и 1989 гг., составляя 100 и 83 % от абсолютного значения величины АСБ соответственно. При этом в **1988** г. компонентами их структуры были все семь исследуемых показателей почти в равной степени с некоторым преобладанием удельного веса урожайности рыб (до 22 %). В **1989**-м такая картина сохранилась, за исключением урожайности мерланга, имевшей в этот год положительную аномалию.

состояния морской экосистемы в целом и составляющих ее компонент в отдельности. Вклад (%) каждой составляющей в суммарный уровень аномальности рассчитывается из простой пропорции.

Пример такого расчета для некоторых компонент биотической части экосистемы Черного моря представлен на рис. 3.7. Из полученной диаграммы легко оперативно установить, что за период 1981–1990 гг. максимальные величины критерия А (уровня аномальности) отмечались в Черном море в 1981, 1984, 1986 и 1990 гг., а минимальные в 1982 г. При этом во всех случаях максимумов преобладали положительные аномалии, составлявшие по годам соответственно 82, 74, 64 и 67 % от абсолютного значения величины индекса А.

Структура положительных аномалий в годы максимумов существенно изменялась. В **1981** г. ее компонентами были: урожайность ставриды (62 %) и мерланга (10 %), а также биомасса калянуса (23 %) и теплолюбивых форм зоопланктона (6 %). В **1984** г. она включала урожайность шпрота (89 %) и хамсы (11 %), в **1986**-м – урожайность хамсы (17 %), биомассу теплолю-

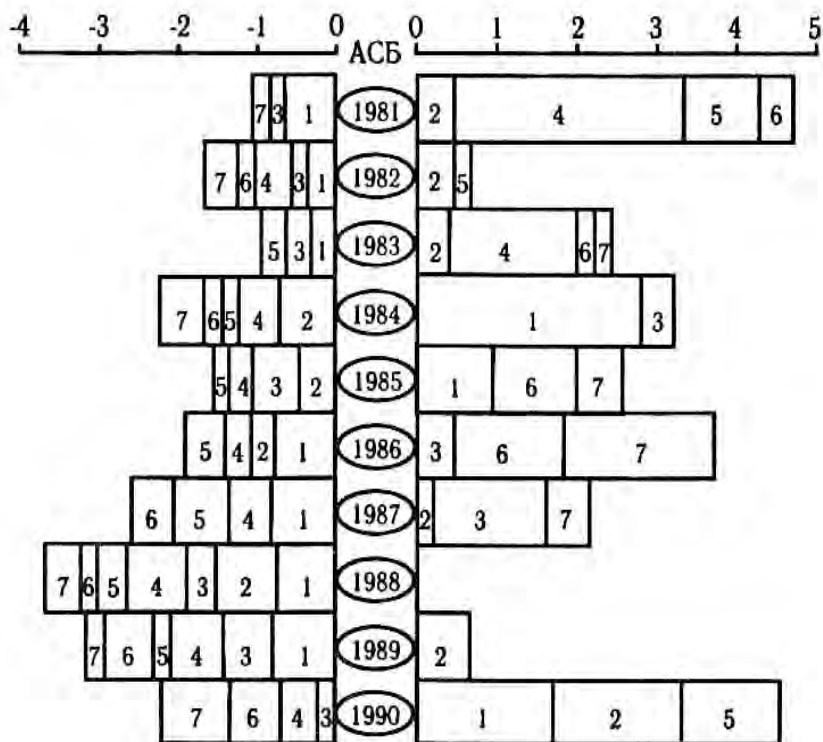


Рис. 3.7. Динамика индекса аномальности состояния (АСБ) основных компонент пелагического комплекса биотической части экосистемы Черного моря. 1, 2, 3, 4 – урожайность, соответственно, шпрота, мерланга, хамсы, ставриды; 5, 6, 7 – биомасса (мг/м^3), соответственно, холодолюбивых, теплолюбивых и некормовых форм зоопланктона.

Переходя к оценке межгодовой изменчивости состояния компонент пелагического комплекса, исследованных с помощью критерия АСБ, легко установить, что на протяжении периода 1981–1990 гг.:

1. Урожайность шпрота, хамсы и ставриды практически ежегодно была ниже среднееголетнего уровня. Исключение для шпрота составляли 1985 и 1990 гг., для хамсы – 1984, 1986 и 1987 гг., а для ставриды – 1981 и 1983 гг.

2. Урожайность мерланга в начале и конце десятилетия превышала норму, а в середине периода (1984–1988 гг.) была ниже или на уровне среднееголетней.

3. Биомасса популяции холодолюбивого вида зоопланктона (калянуса) в начале (1981, 1982 гг.) и конце (1990 г.) исследуемого периода превышала среднееголетний уровень, а в остальные годы была ниже нормы.

4. Биомасса популяций теплолюбивых мелких форм зоопланктона со второй половины 80-х гг. была постоянно ниже среднееголетней.

5. Биомасса популяций некормовых форм зоопланктона в се-

редине 80-х гг. (1983, 1985–1987 гг.) превышала норму, а в начале и конце была ниже ее.

Карты последствий хозяйственной деятельности для условий морской среды. В результате многолетних полевых исследований было установлено, что причина развития зон придонной гипоксии и сероводородного заражения на северо-западном шельфе Черного моря состоит в параллельном изменении гидрологической структуры его вод (ухудшение аэрации глубинного слоя) и интенсификации здесь потребления кислорода в результате зарегулирования и изменения качества речного стока. Последствия этих процессов – временная и пространственная изменчивость зон гипоксии и сероводородного заражения, представлены на АМЭК (рис. 3.8).

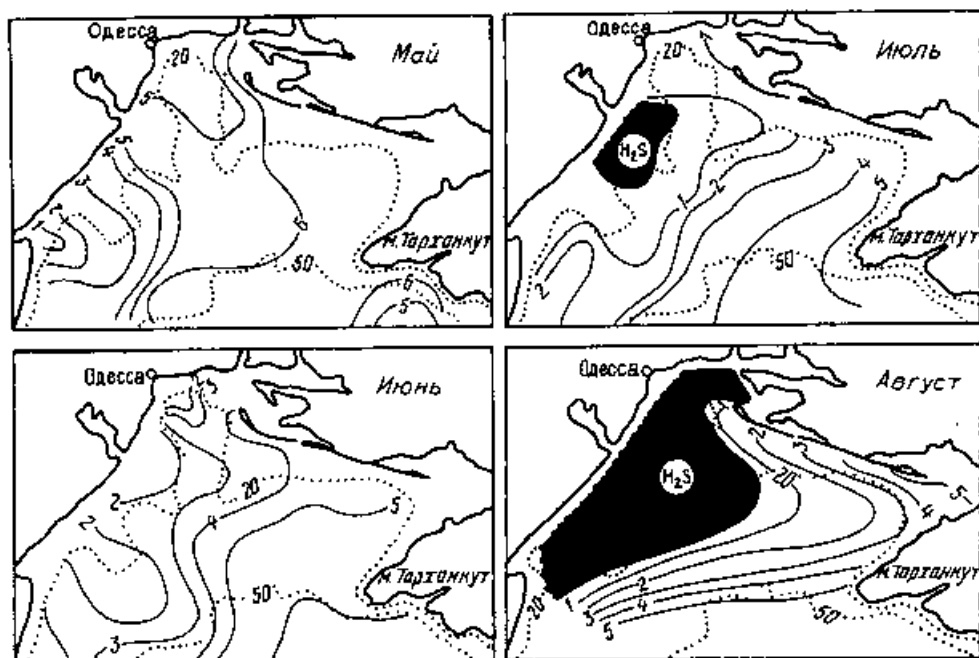


Рис. 3.8. Последствия зарегулирования и эвтрофирования речного стока для гидрохимического режима придонного слоя вод северо-западного шельфа Черного моря в весенне-летний период 1990 г. [Фащук, 1995]. Изолинии – содержание кислорода в мл/л. Темные участки – анаэробные зоны с концентрациями H_2S 0,2 (июль) – 0,7 (август) мл/л и вертикальным развитием от 2 до 10 м (при глубинах моря соответственно 8 и 25 м).

Основная причина сокращения площадей промысловых моллюсков и водорослей в СЗЧМ состоит в ухудшении здесь кислородного режима вод придонного слоя в летний период [Золотарев и др., 1996]. Последствия этого антропогенного фактора – повторяемость и масштабы развития зон гибели донного населения на северо-западном шельфе, представлены на АМЭК (рис. 3.9; 3.10).

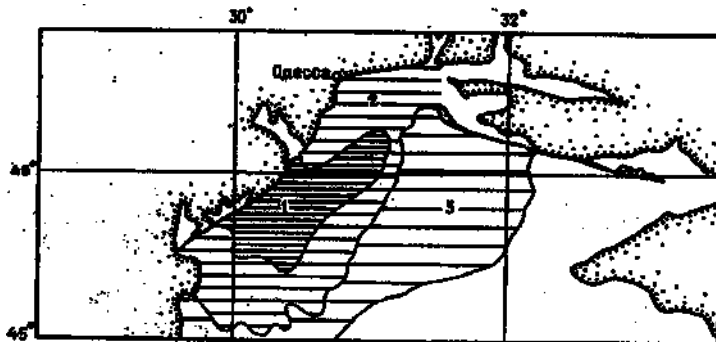


Рис. 3.9. Последствия развития гипоксии и анаэробных зон для бентосных организмов северо-западного шельфа Черного моря за период 1979–1992 гг. [Золотарев и др., 1996]. 1 – повторяемость полной гибели донного населения 100 % (площадь – 20 % всей зоны развития заморов, составляющей около 23 тыс. км²; глубины – от 8 до 20 м); 2 – повторяемость полной гибели донного населения 50–90 % (площадь – 35 % всей зоны развития заморов; глубины – от 20 до 30 м); 3) повторяемость полной гибели донного населения один раз в два-четыре года (площадь – 45 % всей зоны развития заморов; глубины – > 30 м).

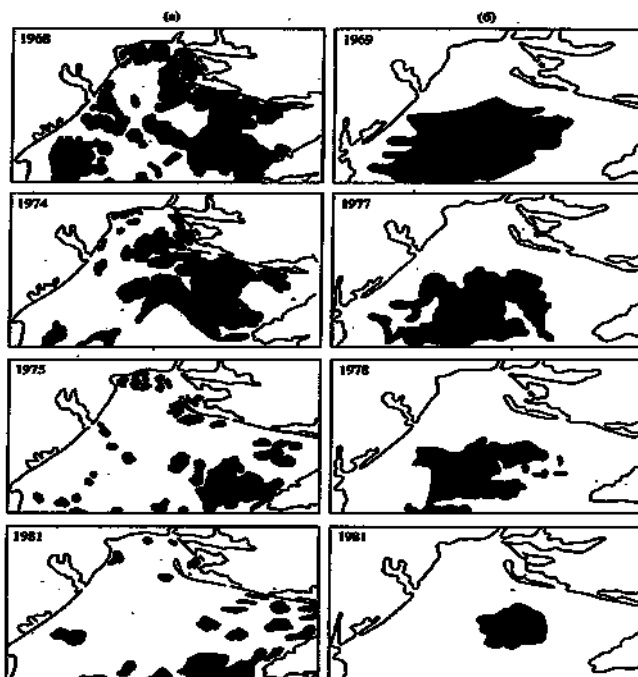


Рис. 3.10. Деградация площадей мидийных банок (а) и полей филлофоры (б) на северо-западном шельфе Черного моря в результате развития здесь летних анаэробных зон [Фащук, 1995].

Одним из последствий прямого сброса в море нефтепродуктов является формирование на его поверхности нефтяных пленок. На рис. 3.11 представлено распределение повторяемости этого явления в Черном море, рассчитанной по данным его внутригодового многолетнего авиационного мониторинга.

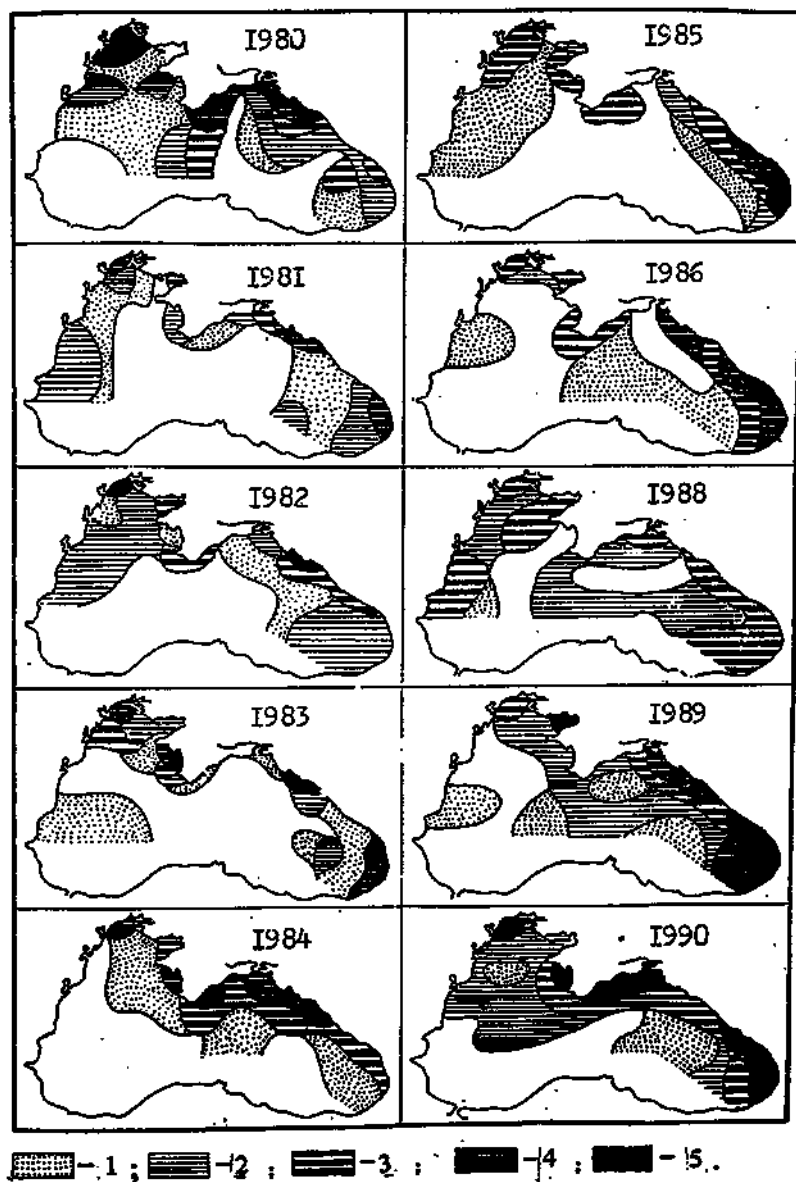


Рис. 3.11. Последствия нефтяного загрязнения Черного моря [Фащук и др., 1996]. Повторяемость случаев наблюдения пленок НП: 1 – до 20 %; 2 – до 30; 3 – до 50; 4 – до 70; 5 – до 100 %.

Анализируя карты распределения внутригодовой повторяемости зон скопления пленок НП (рис. 3.11), легко установить, что за исследуемый период (1980–1990 гг.) этот показатель в СЗЧМ в районе Дунай – Одесса снизился от 70–100 до 30–50 % случаев в год. В то же время расширились зоны скопления и участились случаи фиксации нефтяных пленок вдоль побережья от м. Тарханкут до Севастополя и от Сочи до Батуми. В районах Ялта – Феодосия, Анапа – Новороссийск, Туапсе – Сочи в течение всего исследуемого периода сохранялась высокая устойчивость таких зон (показательны 1980, 1984, 1986 и 1990 гг.).

Наиболее устойчивыми районами скопления нефтяных пленок в 1981–1990 гг. (повторяемость явления внутри года более 50 %) оказываются мелководные участки СЗЧМ, побережье от Новороссийска до Туапсе и от Сочи до Батуми, где такие ситуации отмечались ежегодно (рис. 3.12 а). Повторяемость аналогичных обстоятельств на акватории от Керченского пролива до Новороссийска и от Туапсе до Сочи составила 70 %, вдоль побережья Крыма и в открытой восточной части моря – 50, а в районе свала глубин СЗЧМ – 20–30 %.

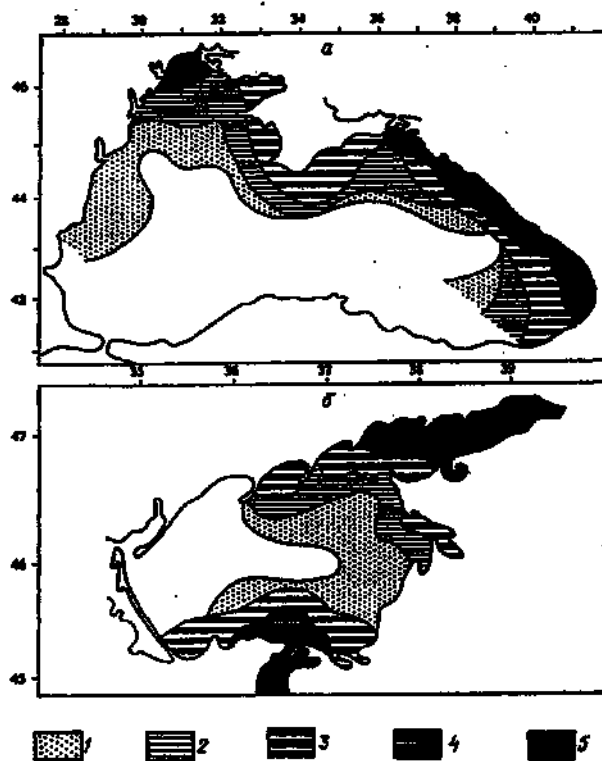


Рис. 3.12. Последствия загрязнения Черного (а) и Азовского (б) морей нефтепродуктами для поверхностного слоя их вод за период 1981–1990 гг. [Фащук и др., 1996]. 1 – 5 – устойчивость зон скопления (более 50 % случаев в год) пленок нефтепродуктов соответственно до 20, 30, 50, 70 и 100 %.

Максимальная межгодовая устойчивость зон высокой вероятности скопления пленок НП отмечается в Таганрогском заливе и в северной части моря (50–100 % случаев), а наиболее благоприятными по этому показателю оказались районы центральной, западной и северо-западной частей Азовского моря, где устойчивых скоплений нефтяных пленок в 1981–1990 гг. не наблюдалось (рис. 3.12 б).

В результате промысла рыбы донными орудиями лова и поступления в придонный слой избыточного количества взвешенного органического вещества (вторичного загрязнения), образующегося после прекращения «красных приливов» (интенсивного развития фитопланктона), в СЗЧМ нарушается режим осадконакопления – происходит интенсивное заиление дна. Масштабы зон этого явления и его интенсивность представлены на АМЭК (рис. 3.13).



Рис. 3.13. Последствия донного тралового промысла и вторичного загрязнения для режима осадконакопления в северо-западной части Черного моря на период начала 80-х гг. [Зайцев, Фесюнов и др., 1992]. 1 – зона распространения мелкодисперсных частиц (наилка) в придонном слое (площадь – более 5 тыс. км², скорость седиментации – 5–40 мм в год, на два-три порядка выше природной); 2 – зона с толщиной наилка 3–5 см (площадь – 3350 км²), в том числе толщиной 30–50 см (площадь – 750 км²).

3.4.3. Комплексное представление морской экологической информации

Закономерным этапом процесса морского экологического картографирования является попытка объединить собранные в аналитических картах элементы жизни моря в комплексную картину на единой географической основе.

Отмеченные специфические особенности природных и антропогенных импульсов, способов сбора и обобщения экологических

данных определяют тот факт, что общая картина распределения явлений, неблагоприятных для Черного моря, и механизмов их развития оказывается несинхронной (сроки, масштабы и продолжительность различного рода кризисов существенно отличаются). Ее целостное изображение представляется возможным в этой связи только в рамках *генеральной комплексной экологической карты-схемы*. В этом документе объединяются (в виде символов) все выделенные в биогеосистемном «портрете» антропогенные факторы и их негативные последствия. При этом характеристика интенсивности и пространственно-временных масштабов нагрузок, а также отрицательных реакций моря раскрывается через легенду.

Таким образом, если географо-экологическая модель морского водоема оказывается суммой основных экологически значимых результатов исследований его природы, то легенда комплексной экологической карты-схемы моря является концентрированным представлением этого портрета и отражает:

- комплекс понятий, изображенных на карте;
- набор обозначений, использованных для их изображения;
- тип (участвующие компоненты) представляемых отношений «внешнее воздействие – реакция экосистемы»;
- точность использованных данных, правила генерализации и гармонизации изображений;
- сроки, глубины, временные и пространственные масштабы действия нагрузок и развития негативных явлений в экосистеме.

При оценке состояния морских акваторий аналитические и комплексные морские экологические карты составляют в первую очередь, так как заключенная в них информация является основой диагноза благополучия состояния водоема. В настоящее время реально только эпизодическое составление таких карт, однако, входя в систему экологического мониторинга, этот процесс должен заменяться (в будущем) периодическим, вплоть до непрерывного.

Интегральные карты-схемы развития природных процессов в водоеме

На рис. 3.14 представлен пример интегральной карты-схемы основных природных процессов, определяющих формирование условий морской среды в Черном море и являющихся приоритетными для благополучного существования основных промысловых гидробионтов водоема и объектов их питания. Она построена на основании информации, полученной при анализе биологических данных, в процессе которого выделялись эти факторы, и позволяет оперативно оценить возможные природные причины аномальных морских экологических ситуаций.

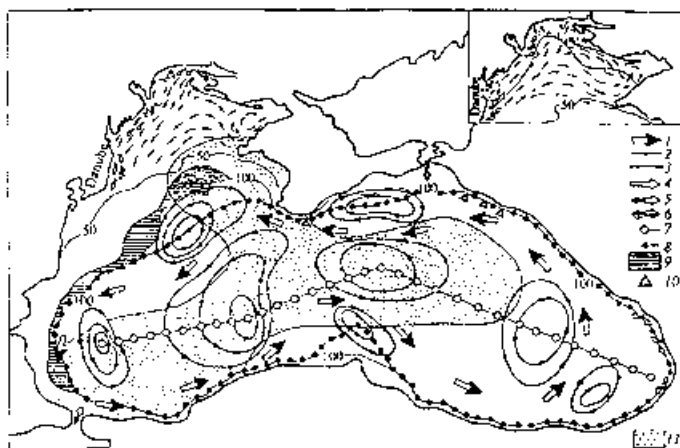


Рис. 3.14. Карта-схема основных природных процессов, определяющих формирование условий среды в Черном море [Фащук, 1997]. 1 – основное черноморское течение; 2 – синоптические вихревые образования; 3 – дрейфовые течения; 4 – стоковые течения; 5 – обмен через проливы; 6 – зоны дивергенции (расхождения) вод; 7 – зоны конвергенции (опускания) вод; 8 – районы максимального волнения.

Интегральные карты-схемы видов хозяйственной деятельности на акватории и водосборе морского водоема

Результаты исследования характера и форм хозяйственной деятельности на морской акватории и водосборе наглядно представляются в виде интегральных карт-схем (рис. 3.15), позволяющих потенциальным природопользователям оперативно сориентироваться при оценке возможных причин морских экологических проблем.

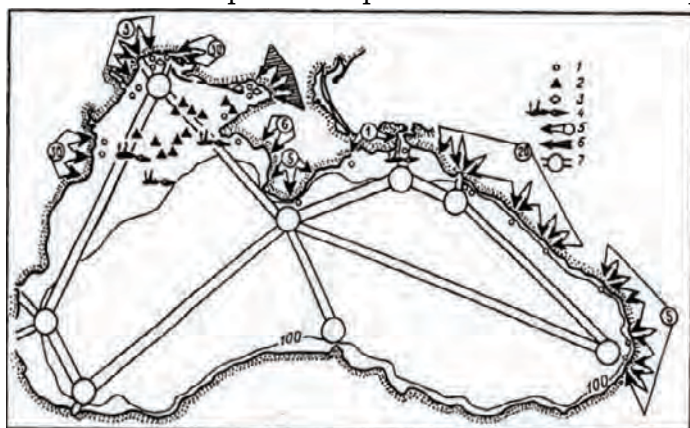


Рис. 3.15. Хозяйственная деятельность на акватории Черного моря. 1 – свалки грунта; 2 – бурение на газ; 3 – добыча песка; 4 – донный траловый промысел рыбы; 5 – сброс загрязняющих веществ (в % от суммарного); 6 – сброс дренажных вод; 7 – трассы морских перевозок.

Интегральные карты-схемы уровня антропогенной нагрузки на морскую акваторию и ее последствий для условий морской среды

В процессе исследования масштабов хозяйственной деятельности и ее последствий для условий среды морского водоема огромные массивы цифрового материала, отражающие эти процессы, преобразуются в наглядные диаграммы с помощью расчета простых интегральных индексов.

1. Для наглядного представления и оперативного анализа информации о количествах ЗВ, поступающих в реки и различные районы моря из различных источников, а также сравнительной характеристики отдельных рек и различных районов моря по уровню их нагрузки ЗВ предложен безразмерный индекс суммарной удельной антропогенной нагрузки (**СУАН**). Для рек его формула имеет вид:

$$\text{СУАН}_p = \frac{Q}{N} \sum_{j=1}^N (q/P)_j, \quad (3)$$

где **Q** – суммарный среднегодовой сток рек в Черное море за исследуемый период времени; **q** – среднегодовой сток реки (км³) за этот же период; **p** – среднегодовое количество отдельного вида ЗВ (т), поступившее в реку в течение исследуемого периода; **P** – общее количество отдельного вида ЗВ (т), поступившее в реки; **N** – количество видов ЗВ.

Если в формуле (3) заменить: значение **Q** – на величину суммарного речного стока в море в конкретный год (т); значение **q** – на величину стока исследуемой реки в этот год (км³); **P** – на величину суммарного количества (т) ЗВ данного вида, поступившего в море с речным стоком за исследуемый период; а **p** – на величину количества отдельного вида ЗВ (т), поступившего в исследуемую реку в исследуемый год, то получим выражение для расчета СУАН реки и его структуры не для периода лет, а для конкретного года, входящего в данный период.

2. Для вод шельфа формула индекса несколько видоизменяется:

$$\text{СУАН}_\text{ш} = \frac{S}{N} \sum_{j=1}^N (s/P)_j, \quad (4)$$

где **S** – площадь шельфа моря до изобаты 100 м; **s** – площадь исследуемого участка шельфа (км²); **p** и **P** – аналогично для СУАН_p, но на исследуемый участок шельфа и весь шельф соответственно.

Таким образом, в физическом смысле индекс **СУАН** представляет сумму процентов каждого из ЗВ от его общего количества, поступившего в реки или море, приходящуюся на единицу стока реки или площади исследуемого участка шельфа соответственно.

3. Для оценки ответной реакции речных и морских вод на антропогенную нагрузку в виде сброса ЗВ используется известный условный индекс загрязненности вод ИЗВ.

В качестве примера наглядного представления информации

об уровне антропогенной нагрузки рек и прибрежных морских акваторий были рассчитаны соответствующие индексы для основных рек и районов шельфа Черного моря по информации различных ведомств за период 1985–1989 гг., которая предварительно была собрана в сводных, труднодоступных для оперативного анализа таблицах.

Из построенных диаграмм (рис. 3.16) легко оперативно оценить, что, несмотря на большой объем годового стока р. Дунай и, соответственно, преобладающий ее вклад в сумму поставок в Черное море ЗВ, СУАН его вод основными видами загрязняющих веществ за период 1985–89 гг. оказался ниже, чем для Днепра (высота диаграммы). При этом в Днепре преобладала нагрузка NH_4^+ и СПАВ – соответственно 27 и 31 % от суммарной, а для Дуная несколько выше, по сравнению с другими ЗВ, оказалась нагрузка Робщ и Нобщ, а также ХОП (по 17 %). Кроме того, удельный вес нагрузки вод Дуная Робщ, Нобщ и ХОП соответственно в 3,4 и 8,5 раза выше, чем для Днепра, по фенолам и НУ это соотношение в реках примерно одинаковое, а по NH_4^+ и СПАВ в Дунае оно соответственно в 2,5 и 3 раза ниже, чем в Днепре.

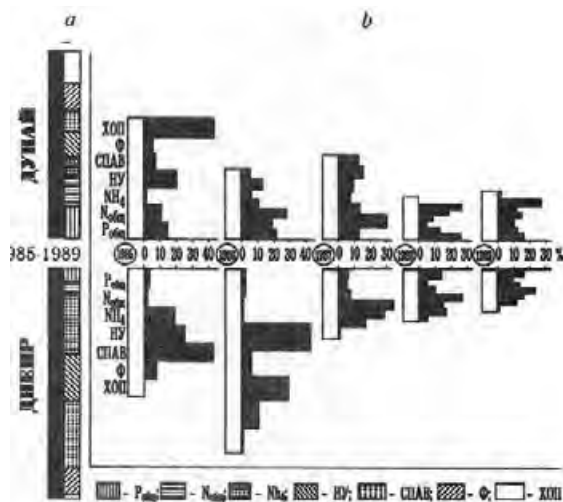


Рис. 3.16. Суммарная удельная антропогенная нагрузка Дуная и Днепра загрязняющими веществами и ее структура.
а – средняя для периода 1985–1989 гг.; б – ежегодная.

Площадь северо-западного шельфа Черного моря (СЗЧМ) в пределах изобат 0–100 м в 20 раз превышает площадь шельфа ЮЗ Крыма, в 40 – площадь шельфа ЮБК, в 5 и 10 раз – площади шельфов Сев. Кавказа и Грузии. Тем не менее по диаграммам (рис. 3.17) легко оценить, что СУАН этого района выше всех указанных зон шельфа соответственно в 9, 5, 18 и 16 раз. Шельф Краснодарского края, стоящий на втором месте по количеству

сбросов ЗВ с побережья и получающий 20 % их суммарного поступления в Черное море, оказался по показателю СУАН на последнем месте.

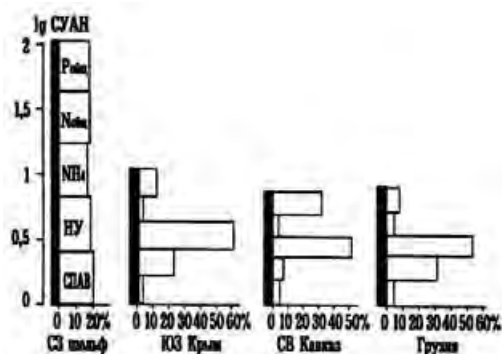


Рис. 3.17. Суммарная удельная антропогенная нагрузка загрязняющими веществами прибрежных поверхностных вод и ее структура в различных районах Черного моря.

Структура нагрузок ЗВ существенно изменяется по районам. В СЗЧМ все рассматриваемые компоненты загрязнения вносят одинаковый вклад (по 20 %) в величину СУАН. Для всех рассматриваемых районов шельфа, за исключением СЗЧМ, характерно преобладание нагрузок NH_4^+ (50–70 %). На шельфе Сев. Кавказа, кроме того, существенную роль играют нагрузки Робщ (34 %), а у берегов Грузии и Севастополя – НУ (соответственно 32 и 22 %). Удельный вес Нобщ и детергентов в СУАН всего шельфа, кроме СЗЧМ, не превышает 5–8 %.

Таким образом, введение критерия СУАН позволило объединить и наглядно представить в виде диаграмм (рис. 3.16, 17) весьма объемную цифровую информацию, заключенную в сложных, громоздких сводных таблицах, сделав ее доступной для оперативной оценки уровня нагрузки рек и прибрежных вод ЗВ, а также анализа удельного веса каждого из ЗВ в ее суммарной величине.

3.4.4. Прогностические морские экологические карты

На прогностических экологических картах представляются результаты сценарных расчетов различных вариантов возможных последствий для морской экосистемы гипотетических природных катастроф или аварий в процессе хозяйственной деятельности, выполненных с помощью аппарата математического моделирования. В качестве примера на рис. 3.18. представлены прогностические расчетные траектории перемещения пятна (1500 т) нефтепродуктов после гипотетического их разлива в Керченском проливе Черного моря. Расчеты выполнены на российской гидродинамической модели SPILLMOD.

1-2



3-4



5-6



Рис. 3.18. Прогностическая динамика пятна сырой нефти после разлива (1500 т) на якорной стоянке у входа в Керченский пролив под влиянием преобладающих течений и конкретных ветровых ситуаций. Цифры у пятен – время после разлива. Траектории нефтяного разлива: 1, 2 – восточный ветер 5 и 10 м/с соответственно при черноморском потоке; 3 – южный ветер 10 м/с при черноморском потоке; 4 – восточный ветер 10 м/с при азовском потоке; 5 – западный ветер 10 м/с при черноморском потоке; 8 – западный ветер 10 м/с при азовском потоке.

Используя комплект полученных расчетных прогностических карт, легко оценить, что для крымского побережья Керченского пролива в случае аварийного разлива 1500 т нефтепродуктов у входа в

пролив **при черноморском течении** загрязнение пляжей следует ожидать в зонах: пос. Аршинцево – через 24 часа при восточном ветре силой 5 м/с; пос. Героевское – через 12–14 часов при восточном ветре силой 10 м/с; пос. Жуковка на выходе из пролива в Азовское море – через 22 часа при южном ветре силой 10 м/с. **При азовском потоке** загрязнение пляжей крымского побережья Керченского пролива следует ожидать при восточном ветре силой 5 м/с в районе м. Такиль, пос. Заветное – через 24 часа после разлива, а при этом же ветре силой 10 м/с – через 10 часов.

Для российского побережья Керченского пролива при аналогичной аварии в случае **черноморского потока** нефтяное пятно закроет зону Таманского полуострова между мысами Тузла и Панагия при западном ветре 5 м/с через 15, а при этом же ветре силой 10 м/с – район м. Панагия через 8–10 часов. **При азовском потоке** загрязнение этих районов побережья происходит через 14 часов только в случае западного ветра силой 10 м/с.

При других ветровых ситуациях, независимо от направления преобладающего потока в проливе, разлив нефти на якорной стоянке у южного входа для его побережья опасности не представляет – пятно нефти уносится в открытое море.

3.4.5. Генеральные экологические карты-схемы морских водоемов

На основании построенных морских экологических карт и результатов расчетов интегральных показателей (§ 3.4.2–3) составляется генеральная экологическая карта-схема водоема, на которой представлено распределение основных форм хозяйственной деятельности на его акватории, показателей интенсивности нагрузки его вод загрязняющими веществами и негативных для экосистемы последствий антропогенного воздействия. Для Черного моря она представлена на рис. 3.19. Конкретизация сути каждого компонента, отраженного на карте, может быть осуществлена из содержания соответствующих разделов географо-экологической информационной модели-«портрета» водоема.

3.5. Толерантность морских организмов к воздействию загрязняющих веществ

Информация об устойчивости гидробионтов к воздействию загрязняющих веществ содержится в многочисленных публикациях и обзорах отечественных и зарубежных авторов. Мы систематизировали эти данные с целью использования при решении конкретных экологических проблем. В результате была получена схема возможных реакций морских организмов на разных стади-

ях развития на воздействие токсических химических соединений и элементов, позволяющая оперативно оценить возможные причины деградации их популяций, гибели отдельных особей, а также выявить виновников этих явлений.

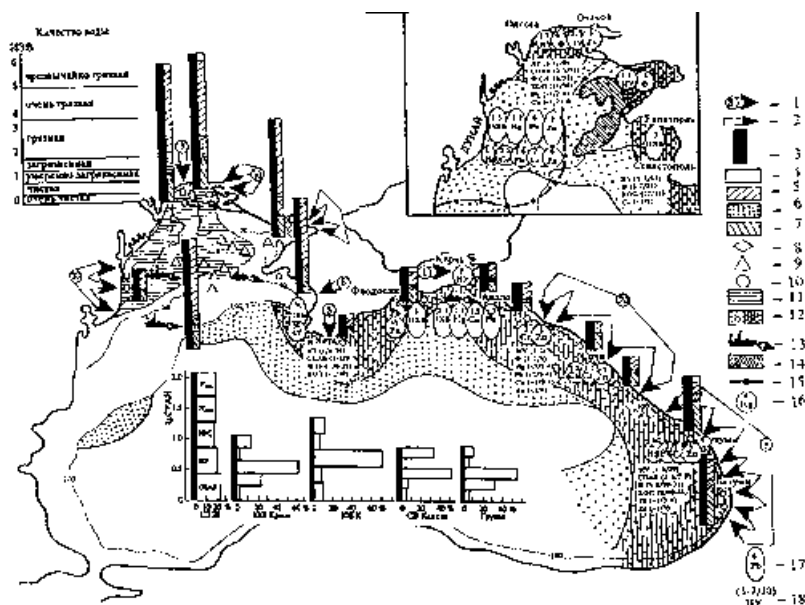


Рис. 3.19. Генеральная экологическая карта-схема характера хозяйственной деятельности, показателей интенсивности нагрузки Черного моря загрязняющими веществами и негативных для экосистемы последствий антропогенного воздействия. 1 – сброс загрязняющих веществ с побережья и с речным стоком (в % от суммы); 2 – сброс загрязняющих веществ с коллекторно-дренажными водами; 3 – условный индекс загрязненности вод (4–7 – пестициды, фенолы, СПАВ; нефтепродукты); 8 – зоны добычи песка; 9 – места разработки газовых месторождений и разведочного бурения; 10 – места захоронения (дампинга) грунтов; 11 – зоны развития анаэробных условий; 12 – границы распространения пленок нефтепродуктов (слева) и зоны их устойчивого скопления (справа); 13 – траловый промысел рыбы; 14 – участки заиления дна; 15 – зоны развития явления «красный прилив»; 16 – превышение содержания загрязняющих веществ в грунтах над природным геохимическим фоном (цифры – количество раз); 17 – превышение содержания загрязняющих веществ в гидробионтах предельно допустимого уровня (цифры – количество раз); 18 – превышение содержания загрязняющих веществ в воде величин предельно допустимых концентраций (цифры – количество раз, числитель – среднее, знаменатель – максимальное).

3.5.1. Нефтепродукты, фенолы, детергенты

С начала 60-х гг. эпизодические, разрозненные наблюдения за влиянием ЗВ органического происхождения на морские организмы приобрели регулярный целенаправленный характер. За последующий 30-летний период исследований отечественные и зарубежные ученые убедились в том, что в разных экспериментах реакция одних и тех же видов организмов на присутствие в воде указанных токсикантов может быть прямо противоположной. Это объясняется сложностью состава данного вида ЗВ, который определяет их способность не только подавлять, но и стимулировать жизнедеятельность гидробионтов. Так, нефть, например, по своей природе является многокомпонентным субстратом, в состав которого входят как токсические соединения, так и полезные биологически активные вещества. «Нефтяной яд» представляют: предельные углеводороды, летучие кислоты и фенол, органические основания, нафтеновые кислоты (основной токсикант для рыб), переходящие в раствор при взаимодействии нефтепродуктов с водой. В то же время стимулятором биопродукционных процессов оказываются такой компонент нефти, как «нефтяное ростовое вещество», и некоторые другие соединения.

Сочетание таких антагонистических свойств определяет сложность исследования пределов токсичности и пороговых концентраций ЗВ органического происхождения для морских организмов. Кроме того, в них практически отсутствует информация о влиянии фенолов на жизнедеятельность гидробионтов. Это, очевидно, связано с тем, что одним из источников их поступления в море, как отмечалось выше, является результат взаимодействия нефтепродуктов с водой, и токсические последствия этого ядохимиката, таким образом, учитывались при аналогичных оценках для нефти. Однако, принимая во внимание тот факт, что не менее важным источником поступления фенолов в водоем оказываются прямые его сбросы с отходами производства нефтехимической, целлюлозно-бумажной, лесной промышленности, а также предприятий коммунального хозяйства, изучению толерантности морских организмов к изолированному воздействию этого токсиканта также уделялось внимание в научных исследованиях.

По характеру воздействия на гидробионты нефтепродукты и фенолы сходны с нервно-паралитическими ядами. Основными симптомами и последствиями отравления этими веществами являются:

1. *Расстройство центральной нервной системы* – нарушение двигательных рефлексов и потеря ориентации (усиление хаотической двигательной активности с последующими судорогами и гибелью у рыб, подавление фильтрационной активности у моллюсков); нарушение рефлекса равновесия (плавание на боку).

2. *Нарушение физиологических процессов в клетках* – гибель в результате воздействия углеводов на мембранную активность и другие клеточные и надклеточные процессы (повреждение жаберного эпителия, нарушение структуры органов и тканей, па-

различ дыхания); изменение поведенческих реакций (отказ от пищи, потеря чувствительности кожи, нарушение репродуктивной функции, способности прикрепляться к субстрату); замедление или прекращение процесса деления клеток у микроводорослей.

3. Включение углеводов нефти в ткани организмов, аккумуляция канцерогенов – снижение насыщения крови кислородом (удушье); нарушение белкового баланса (в составе биомассы возрастает доля белка); нарушение углеводного обмена в крови (снижение содержания глюкозы, гликогена и молочной кислоты – разрушается защитная система организма); нарушение углеводного обмена в печени, сердце, мышцах (уменьшаются углеводные запасы); развитие уродства и потеря жизнестойкости молоди (вырождение популяции).

Диапазоны **токсических** (снижение биологических показателей на 50 % за двое-четверо суток) и **пороговых** (снижение биологических и физиолого-биохимических показателей на 50 % за период онтогенеза) концентраций нефти для основных видов морских организмов представлены на рис. 3.20 а.

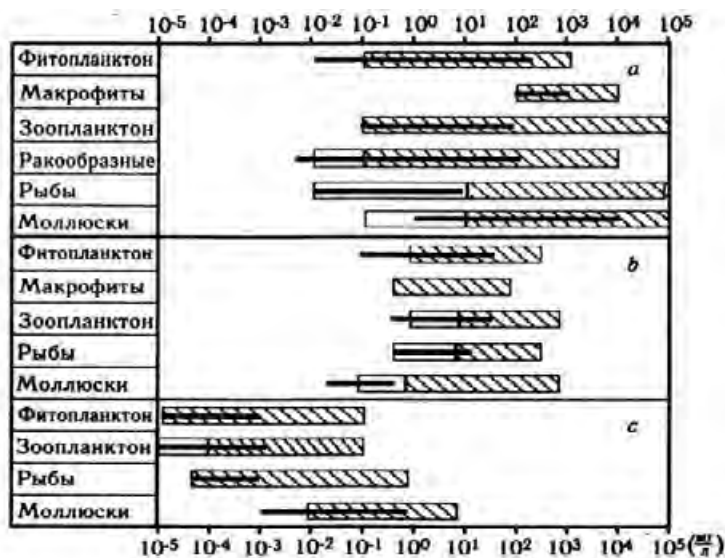


Рис. 3.20. Диапазоны токсических (прямоугольники) и пороговых (жирные линии) концентраций в среде нефти (а), детергентов (б) и ХОП (в) для основных групп морских организмов [Патин, 1979]. Незашифрованные области – диапазоны для ранних стадий развития.

Результаты аналогичного анализа данных о толерантности морских организмов к прямому воздействию фенола показали:

1. Подавление процесса фотосинтеза у микроводорослей происходит при концентрациях токсиканта 10–15, а прекращение – при 600–700 мг/л. Самыми стойкими оказываются зеленые, наи-

более чувствительными – сине-зеленые, а диатомовые водоросли занимают промежуточное положение.

2. Для личинок зоопланктона фенол токсичен в концентрациях 10–12 мг/л, 100 % этих подопытных организмов гибнут за два-четыре дня при 125, а их взрослых форм – при 70–90 мг/л.

3. Моллюски выдерживают концентрации токсиканта до 400–1600, а ракообразные – от 20 до 240 мг/л.

4. Выклев личинок рыб замедляется при концентрации фенола 1 мг/л, при 10 – он осуществляется только на 50 %, а при 200 мг/л не наступает вообще.

5. Для взрослых особей рыб (мерланг, камбала-глосса, смариды) фенол токсичен в концентрациях 0,1–10 мг/л.

3.5.2. Хлорорганические пестициды

Вспышка производства и интенсивного применения в практике сельского хозяйства пестицидов, произошедшая в послевоенные годы практически во всех развитых странах, была обусловлена в основном их высокой эффективностью в борьбе с вредителями и сорняками на полях, а также с зарастанием прудов, водохранилищ и каналов. В этой связи до начала 50-х гг. внимание большинства исследователей было обращено на изучение токсического воздействия ХОП на соответствующие сорняки, насекомые и водоросли. Только в середине 60-х гг., когда в дельтах и эстуариях рек Атлантического побережья США и других прибрежных районах начали отмечаться случаи «загадочной» массовой гибели крабов, моллюсков и рыб, эта проблема – опасность ядохимикатов для полезных морских организмов, составила один из основных разделов водной токсикологии и нашла широкое отражение в научных изысканиях исследователей всего мира.

В качестве пестицидов в настоящее время используется более 900 веществ, на базе которых создано свыше 100 тыс. различных препаратов. В зависимости от своего назначения все они объединяются в 22 группы, из которых для рыбного хозяйства, например, имеют значение: 1) **инсектициды** – средства борьбы с насекомыми вредителями; 2) **гербициды** – средства борьбы с сорняками; 3) **альгициды** – средства борьбы с водорослями и высшей водной растительностью.

Токсическое воздействие ХОП на гидробионтов сходно с картиной отравления нервно-паралитическими ядами, а также проявляется в нарушении водного, солевого, липидного (жирового) обмена веществ. При этом его механизм не универсален и требует специальных исследований по каждому виду ядохимиката в отдельности. Эффект интоксикации возрастает при повышении температуры, снижении содержания в воде кислорода, а также при взаимодействии ХОП с другими токсикантами. Основными симптомами хронического воздействия пестицидов на морские гидробионты являются: **1) подавление фотосинтетической дея-**

тельности фитопланктона и высшей водной растительности; **2)** нарушение реакции на внешние воздействия – потеря температурного преференда (способности выбирать температуру), нарушение хеморецепции (чувствительности к воздействию химических веществ) у рыб и моллюсков; **3)** нарушение оборонительной реакции – потеря у рыб способности избегать среды с опасными концентрациями токсикантов, нарушение их стайного поведения; закапывание в грунт у моллюсков; использование раковин ракообразными; **4)** изменение чувствительности сенсорных рецепторов, активности боковой линии и кожных тактильных рецепторов – потеря способности ориентироваться; **5)** нарушение осморегуляции; **6)** ослабление сократительной способности мышц – снижение силы и скорости прикрепления к субстрату – у моллюсков; **7)** искривление и ломкость позвоночника у рыб – снижение содержания в организмах белка коллагена; **8)** потеря репродуктивной способности у моллюсков – резорбция гонад; **9)** летальные мутации, уродства, гибель на ранних стадиях онтогенеза – вырождение популяций.

Данные о диапазонах токсических и пороговых концентраций ХОП для основных групп морских организмов, выявленных в лабораторных условиях, представлены на рис. 1.20 в.

3.5.3. Тяжелые металлы

По уровню токсичности для гидробионтов тяжелые металлы (ТМ) располагаются в порядке: *ртуть, медь, свинец, кадмий, хром, цинк, мышьяк*. В этой связи, несмотря на значительное их разнообразие в морской воде, литературные сведения о токсическом влиянии ТМ на морские организмы ограничиваются в основном указанными элементами.

Токсичность ТМ определяется в основном их способностью образовывать комплексные соединения, ковалентные связи с атомами углерода, а также участвовать в окислительно-восстановительных реакциях, приводящих к изменению валентности металла. В результате этих процессов в организмах гидробионтов нарушается функционирование биологически активных веществ, повышается способность микроэлементов преодолевать биологические барьеры, нарушается баланс микрофлоры, возникают другие явления, ухудшающие их жизнедеятельность.

Зоопланктон. Планктонные организмы, обладающие минимальной массой и объемом, а также наибольшей удельной поверхностью контакта с окружающей средой, отличаются повышенной чувствительностью к токсикантам различного рода, в том числе и к ТМ.

Ртуть. Токсические и пороговые концентрации этого элемента для фауны беспозвоночных составляют обычно **0,1–10 мкг/л**. При этом наибольшей чувствительностью отличаются ракообразные. В зависимости от их вида и стадии онтогенеза величина кри-

тического содержания Hg в воде может в значительной степени изменяться. Взрослые рачки *Artemia salina* выдерживают концентрации от 140 до 2300 мкг/л, а их науплиальные формы гибнут при величинах на два порядка меньше. Мелкие кормовые формы (копеподы), например, *Acartia tonsa*, гибнут также при незначительных – до 10 мкг/л, концентрациях Hg в воде.

Очень чувствительны к воздействию соединений ртути простейшие организмы. Например, темп деления некоторых видов инфузорий в присутствии всего нескольких мкг Hg в литре воды к концу первых суток эксперимента снижается в три-четыре раза.

Медь. Соединения этого элемента губительно действуют на представителей всех форм зоопланктона. Даже несмотря на предварительную адаптацию, рачки *Artemia salina* гибнут при концентрациях Cu в воде 5–10 мг/л. При этом выживаемость артемии зависит от стадии развития: 50 % яиц погибает за 48 часов при концентрациях меди 30 мкг/л, а взрослых особей – при 12 мг/л. Для простейших гибель 50 % подопытных организмов за 24 часа происходит при содержании Cu в воде от 350 до 800 мкг/л. Существенные изменения численности и видового состава мелких форм зоопланктона в течение 30 суток после начала эксперимента начинается уже при концентрациях этого элемента **5–10 мкг/л**.

Свинец, кадмий, цинк. Пороговые и минимальные токсические величины концентраций этих микроэлементов для большинства форм зоопланктона находятся в пределах **10–100 мкг/л**. Несмотря на слабую изученность их действия на гидробионты, тем не менее известно, что при содержании в воде Pb и Zn соответственно 1 и 10 мг/л у простейших задерживается регенерация бокового надреза. У 50 % инфузорий *Stilanicchia mitilis* при концентрациях Zn 30–35 мг/л через 24 часа после начала эксперимента наблюдается снижение темпа деления в два раза, а у вида *Euplotes harpasc* гибнет половина особей.

С повышением температуры токсическое действие Pb и Cd на зоопланктон возрастает. Кроме того, его устойчивость к этим элементам и цинку изменяется в зависимости от стадии развития. Для некоторых видов бокоплавов, например, при переходе от взрослых особей к ранним стадиям онтогенеза устойчивость к воздействию Zn снижается в пять-восемь раз.

Зообентос. Несмотря на существенную неоднозначность реакции бентических организмов на присутствие в воде ТМ, их чувствительность к этим токсикантам снижается в порядке: *ракообразные, моллюски, черви, мшанки*. Первые два вида имеют промысловое значение. В этой связи, а также по причине удобства изучения (малоподвижные, прикрепленные формы) большинство исследований влияния ТМ на зообентос относится к мидиям, устрицам и креветкам.

Ртуть. Воздействие этого токсиканта на жизнедеятельность моллюсков проявляется в нескольких аспектах: 1) *нарушается функция половых желез*, что приводит к снижению или полной по-

тере способности к размножению; 2) *трансформируются ферменты жабр*, в результате чего нарушается углеводный обмен в организме; 3) *снижается фильтрационная активность* гидробионтов; 4) *нарушается функционирование бисусной железы*, определяющей способность (скорость и силу) прикрепляться к субстрату.

При концентрации Hg в воде 1–10 мкг/л в первые часы эксперимента скорость фильтрации мидий повышается до 130–150 %, но в дальнейшем по мере роста содержания токсиканта (100–1000 мкг/л) она не превышает 17–20 %. При концентрации 32 мкг/л этот показатель у мидий снижается на 50 %, а у моллюска *Perna perna* аналогичный эффект наблюдается при 25 мкг/л.

В случае присутствия Hg в воде в количестве 0,25 мкг/л начинает снижаться активность ферментов (содержания гликогена) в гонадах, мышцах ног и жабрах мидий. Бисус моллюска теряет способность прикрепляться к субстрату при 1 мг/л, а гибель 50 % подопытных мидий в течение 96 часов происходит после достижения этим показателем значения 95,5 мг/л.

Медь. Минимальные токсические и пороговые концентрации меди для большинства групп морских беспозвоночных составляют около **10 мкг/л**. Устойчивость бентосных организмов к токсическому воздействию меди изменяется в зависимости от их вида. Моллюск *Busycon canaliculatum*, например, выдерживает концентрации до 200–500 мкг/л, а для других представителей зообентоса критическая величина концентрации Cu составляет 50 мкг/л и ниже. Порог выживаемости устриц *Venerupis discusata* по меди оказывается 10 мкг/л. Снижение скорости фильтрации в два раза у мидий *Mytilus edulis* происходит при содержании Cu 0,094, а у моллюска *Perna perna* – при 0,22 мкг/л.

Свинец, кадмий, цинк. Токсическое воздействие Pb и Cd на различные формы зообентоса начинается с концентрации этих элементов в воде **10 мкг/л**. При этом также существуют значительные видовые и групповые особенности реакции организмов на эти токсиканты.

50 % креветок *Crangon septemspinosus* гибнут за 96 часов при концентрации Cd в воде 0,32 мг/л, а у мидий аналогичный эффект наблюдается только при 25–33,9 мг/л по кадмию и 195 мг/л по свинцу. Скорость фильтрации этих моллюсков снижается в два раза при концентрациях Pb и Cd соответственно 3,8 и 10 мг/л, а у моллюска *Perna perna* – всего при 417 и 28 мкг/л. Мидия теряет способность прикрепляться к субстрату при содержании Pb и Cd в воде 500 и 10 мг/л.

Токсические концентрации Zn для большинства представителей зообентоса составляют **10–100 мкг/л**. При этом их личинки оказываются в 10–1000 раз более уязвимыми по сравнению со взрослыми особями. В случае содержания Zn в воде в концентрациях до 50–500 мкг/л у личинок многих моллюсков снижается скорость роста, а у личинок полихеты *Capitella capitata* появляются аномальные формы с раздвоенными концами.

Рыбы. Результатом накопления ТМ в организмах рыб оказываются не только прямое отравление гидробионтов, но и последствия, проявляющиеся спустя определенное время, – мутагенные, эмбриотоксические и другие. Сведения о реакции рыб на токсическое воздействие ТМ более многочисленные по сравнению с данными по другим объектам. В результате их анализа удалось сформировать следующие представления.

Ртуть. Присутствие ртути в организмах рыб очень эффективно влияет на функционирование биологически активных соединений – ферментов, гормонов, пигментов, витаминов и др. По этой причине 50 % подопытных икринок гибнут на десятые сутки после их пребывания в воде с содержанием Hg равном 0,1 мкг/л, а у выживших зародышей в дальнейшем наблюдаются необратимые нарушения процесса развития икры (эмбриогенеза).

В результате отравления ртутью взрослых особей рыб у них угнетается дыхание и разрушается респираторный эпителий. При концентрациях Hg 5–10 мкг/л у рыб снижается скорость роста, подавляется обонятельный рефлекс, нарушаются клеточное дыхание в жабрах и ферментативная активность печени, а при величинах 50 мкг/л на четвертые-пятые сутки эксперимента гибнет половина мальков кефалей.

Токсическое действие Hg на рыб усиливается при повышении температуры воды, снижении ее солености, содержании O_2 и величин pH.

Медь. При остром воздействии соединений Cu у рыб развивается некроз клеток почек и жировая деградация, происходит кровоизлияние в мозг. Кроме того, ионы меди осаждают секреты жабер, что приводит к гибели от асфикции; снижают чувствительность организма к другим химическим соединениям – устойчивость к внешним воздействиям, способствуя тем самым развитию эпидемических заболеваний.

Летальная интоксикация молоди и взрослых рыб происходит при концентрациях Cu в воде более **50** (10 ПДК), а личинок – при **10** и более мкг/л. Однако личинки сельди, например, погибали после выклева при содержании меди до 1000 мкг/л, а ее развивающаяся икра не выдерживала концентраций 30 мкг/л. В экспериментальных условиях при концентрациях меди 10–100 мкг/л отмечено снижение скорости роста камбалы. В опытах с радужной форелью зарегистрировано снижение у рыб чувствительности и обонятельного рефлекса при содержании этого токсиканта в воде 8–200 мкг/л.

Свинец, кадмий. При общей, достаточно высокой устойчивости рыб к токсическому воздействию этих элементов биологические последствия отравления взрослых особей соединениями Pb и Cd во многом схожи между собой: 1) наблюдаются потемнение кожи и угнетение процесса дыхания; 2) развивается сколиоз – искривление позвоночника; 3) отмирают сенсорные и поддерживающие клетки боковой линии – теряется способность к осмотической регуляции и ориентированию.

Пороговые концентрации этих токсикантов для морских рыб обычно составляют **100–1000 мкг/л** (10–100 ПДК).

На ранних стадиях развития рыбы более чувствительны к токсическому воздействию Pb и Cd. Так, летальный исход для эмбрионов, личинок и молоди многих видов отмечался при концентрациях токсикантов в воде 10–100 мкг/л, а у молоди форели *Morone saxatilis* необратимое поражающее действие Cd наблюдалось даже при его содержании 0,5 мкг/л. Вместе с тем эмбрионы некоторых видов рыб выживали при концентрациях Pb и Cd до 500–1000 мкг/л, по причине защитного эффекта оболочек икринок.

При концентрациях свинца в воде до 100 мкг/л отмечается значительное угнетение процесса дыхания у кефалей, а половина подопытных рыб этого вида гибнет на вторые-четвертые сутки после начала эксперимента при содержании Cd и Pb в воде соответственно 2000 и 4500 мкг/л. В случае постоянного обитания в среде с концентрацией кадмия всего 3,4 мкг/л первые два поколения форелей *Salvenus fontimelis* гибнут во время нереста. Даже при низких концентрациях свинца (до 1,3 мкг/л) продолжительное присутствие рыб в таких условиях вызывает их гибель вследствие ингибирования ферментов крови.

Цинк. Токсические свойства Zn в воде связаны главным образом с его ионными формами, разрушающими у рыб ферментативные системы и отдельные органы. Присутствие в воде цинка в концентрациях более двух-трех ПДК (20–30 мкг/л) подавляет у молоди и личинок обонятельный рефлекс, нарушает клеточное дыхание в жабрах, ферментативную активность печени, нарушает функции почечной ткани, снижает темпы роста, изменяет поведенческие функции. Нарушая осморегуляторную функцию хлорных клеток, Zn уничтожает эпителий жабр, а в концентрациях, близких к летальным, оказывает мутагенное действие на икру и личинки камбалы-калкан.

Остротоксическое действие на взрослых рыб Zn оказывает при концентрациях **100–1000 мкг/л**, а для наиболее уязвимых стадий развития (эмбриональной и личиночной) такой эффект отмечается при 40–150 мкг/л. Токсическое действие Zn на рыб усиливается при повышении температуры и солености, снижении содержания в воде кислорода, а также в присутствии других токсикантов.

Данные о диапазонах токсических и пороговых концентраций ТМ для основных групп морских организмов, полученные в лабораторных условиях, представлены на рис. 3.21.

Установленные признаки интоксикации гидробионтов и пределы их толерантности к воздействию углеводородов позволяют идентифицировать в море явления болезни, гибели, изменений поведения и внешнего вида многих промысловых гидробионтов. Так, например, с помощью этих знаний легко объясняются причины деградации популяций многих черноморских рыб. Районы их нереста совпали с участками максимального загрязнения моря пленками нефтепродуктов. В результате рыбы погибают еще на ранних стадиях развития, так как на стадии икринки и личинки

они находятся в тонком поверхностном слое и наиболее уязвимы к токсическому воздействию нефтяных углеводородов.

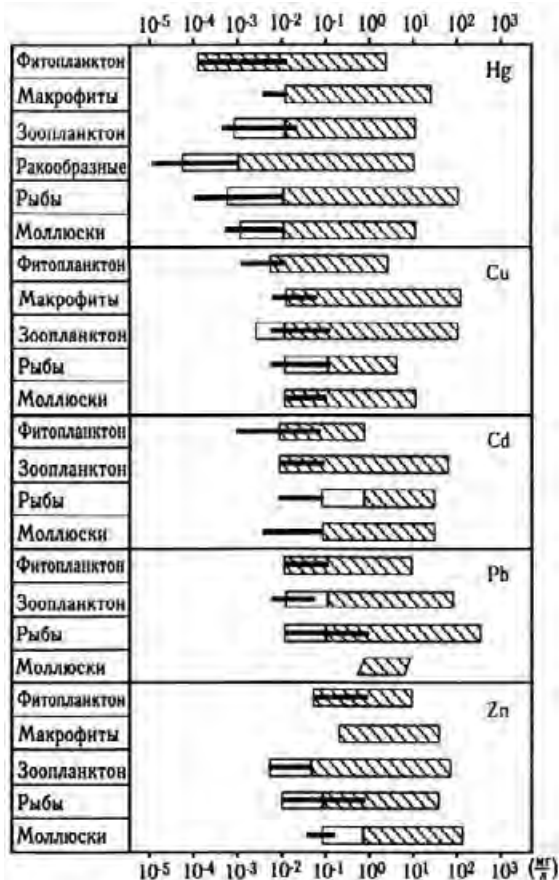


Рис. 3.21. Диапазоны токсических и пороговых концентраций в среде ТМ для основных групп морских организмов [Патин, 1979] (обозначения – рис. 3.20).

Загрязнение донных осадков, например, Севастопольской бухты, нефтепродуктами достигло такого уровня, что ставрида, традиционно нагуливающаяся в придонном слое прибрежной зоны этого района, сегодня имеет «запах нефти» и практически несъедобна из-за накопления в тканях моноароматических углеводородов (бензол, толуол, ксилол и их производные). Аналогичное явление наблюдалось в прибрежных аквахозяйствах по выращиванию лосося у Шетлендских островов в 1993 г., когда после катастрофы здесь танкера «Braer» рыба в садках в течение нескольких дней приобрела запах нефти, утратив товарную ценность. Даже спустя восемь лет после катастрофы танкера «Amoco Cadiz» у берегов Франции (1978) прибрежные донные отложения в районе устричных банок оказались заражены нефтью, а сами устрицы, пораженные опухолями пищеварительного тракта и половых желез, потеряли способность к размножению.

В Северном море в районах нефтепромыслов появились признаки развития уродства массовых промысловых видов рыб на эмбриональном и личиночном уровнях. В дельте Волги аномалии эмбрионального развития осетров уже достигают 50–100 %, а в прибрежных водах Австралии по причине нефтяного загрязнения от 30 до 80 % эмбрионов и личинок рыб оказываются уродами, в то время, когда в чистой зоне их количество не превышает 10 %. В Новороссийской бухте Черного моря за последнее десятилетие количество ихтиопланктона (икринки, личинки рыб), обитающего преимущественно в поверхностном слое (в «атмосфере»), нефтяного загрязнения, сократилось в четыре-восемь раз.

Интересно, что по результатам экспериментов для очистки организма от нефти той же черноморской ставриде необходимо пожить в чистой воде от суток до нескольких недель, причем более жирная рыба «отмывается» значительно медленнее, чем худая. Французские устрицы и английские лососи в клетках, к сожалению, не смогли позволить себе такую роскошь как реанимация чистой водой и вынуждены были погибнуть.

3.6. Интегральная оценка степени остроты морской экологической ситуации

Методики такого анализа сегодня разработаны только по отдельным (токсикологическим, гидрохимическим, гидро- и микробиологическим) показателям. Так, в Институте глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН по результатам деятельности гидробиологической сети и многолетних исследований этих организаций в различных районах Мирового океана в начале 90-х гг. были определены шесть качественных биологических критериев, по которым оценивались негативные последствия антропогенного воздействия и определялись уровни поражения контролируемых морских экосистем. В них вошли:

- изменение средней биомассы популяций планктонных и бентосных организмов;
- упрощение структуры сообществ гидробионтов, уменьшение видового разнообразия, полное исчезновение отдельных видов и замена их на более устойчивые к антропогенному воздействию;
- появление индикаторной (адаптировавшейся) микрофлоры, увеличение ее численности и расширение ареалов распространения;
- резкое сокращение, вплоть до полного исчезновения, макрозообентоса;
- появление видов-вселенцев либо массовое развитие отдельных видов, ведущее к перестройке ценозов;
- эвтрофирование вод и связанные с этим явления изменения биологического и химического режимов.

В зависимости от интенсивности развития указанных процессов (характеризуемой только качественными показателями) состояние морских экосистем оценивалось по четырем градациям: «ста-

бильное», «переходное от стабильного к кризисному», «кризисное» и «катастрофическое». Используя эту шкалу, указанные авторы ранжировали моря, омывающие берега СССР, по степени деградации экосистем (на уровень 1991 г.) следующим образом (в порядке убывания масштабов изменений): Азовское, Черное, Каспийское, Балтийское, Японское, Баренцево, Охотское, Белое, море Лаптевых, Карское, Восточно-Сибирское, Берингово, Чукотское.

Такой подход к комплексной оценке экологического состояния морских водоемов, несмотря на некоторую односторонность (учитываются только биологические показатели), до настоящего времени остается единственным и в определенной степени дает возможность сориентироваться в проблеме. К сожалению, низкое качество современных морских экологических данных, недостаточность информации и несовершенство наших знаний о санитарно-бактериологических, медико-биологических и других аспектах влияния негативных изменений природы моря на жизнедеятельность человека являются причиной отсутствия в настоящее время интегральных критериев оценки степени остроты морской экологической ситуации, учитывавших бы все стороны природы водоемов.

Тем не менее современные исследователи в процессе составления географо-экологических информационных моделей-«портретов» соответствующих морей будут получать (по схеме рис. 3.1) надежную информацию о характере природных процессов и хозяйственной деятельности на их акваториях и территориях водосборов, о наличии определенных тенденций в изменении океанологического режима моря (возможно, и не приводящих пока к негативным экологическим последствиям) или изменениях в состоянии популяций гидробионтов.

Такие обстоятельства дали основание авторам предложить ввести в морскую экологическую практику понятие **«потенциальная экологическая опасность»** для водоема и определить этот интегральный показатель как *сумму экологических весов факторов внешних воздействий на морскую экосистему, способных (из опыта экологических исследований) привести к неблагоприятным изменениям состояния ее отдельных компонент*. Разработка методик определения значения экологического веса каждого фактора предполагается в будущем.

Для морей, омывающих побережье России, выделено 30 факторов потенциальной экологической опасности. Одиннадцать из них относятся к природным особенностям водоемов:

- интенсивность циклонической деятельности над акваторией моря;
- наличие зон интенсивного волнения;
- затрудненный водообмен с открытым океаном и другими морями;
- колебания водного баланса, уровня;
- массообмен между морскими водоемами;
- наличие сезонного и постоянного, ярко выраженного пикноклина;

- наличие ледового покрова или понижение температуры воды до экстремально низких значений;
- развитие зон гипоксии и анаэробных условий в придонном слое;
- нарушение режима солености, развитие после экстремальных паводков обширных зон распреснения поверхностных вод;
- геоморфологические особенности побережья (изрезанность береговой линии, характер рельефа, интенсивность абразии);
- особенности рельефа дна (наличие впадин, поднятий).

Девятнадцать показателей отражают интенсивность антропогенного воздействия на морскую экосистему:

- сокращение речного стока;
- внутригодовое перераспределение речного стока;
- ухудшение качества речных вод;
- сток загрязняющих веществ с побережья;
- донный траловый промысел;
- добыча морепродуктов другими орудиями лова;
- развитие аквахозяйств;
- интенсивное судоходство;
- свалки грунтов;
- захоронение твердых токсичных и радиоактивных отходов;
- захоронение жидких радиоактивных отходов;
- разработка твердых полезных ископаемых;
- добыча нефти и газа;
- наличие нефтегазопроводов и терминалов;
- рекреация;
- аварии танкеров;
- аварии атомных судов;
- наличие экологически опасных производств в береговой зоне;
- ядерные испытания.

Для интегральной оценки состояния морской экосистемы используется отношение полученного значения показателя потенциальной экологической опасности к величине комплексного показателя **«реакции экосистемы на внешние воздействия»**. Он представляет *сумму коэффициентов экологической значимости признаков негативных изменений в состоянии компонент морской экосистемы*. Разработка методик определения значений этих коэффициентов для каждого явления предполагается в будущем. К таким признакам должны относиться (кроме рассмотренных выше шести биологических показателей):

- развитие мутагенных микроорганизмов;
- развитие канцерогенных микроорганизмов;
- развитие патогенных бактерий;
- содержание загрязняющих веществ в воде, превышающее ПДК (предельно допустимые концентрации);
- содержание загрязняющих веществ в грунтах, превышающее ГХФ (геохимический фон);
- содержание загрязняющих веществ в телах гидробионтов, превышающее МДУ (максимально допустимый уровень);
- содержание радионуклидов в воде выше природного фона;

- содержание радионуклидов в донных осадках выше фонового;
- содержание радионуклидов в телах гидробионтов выше МДУ;
- болезни рыб;
- появление видов мутантов.

Таким образом, предлагаемый показатель отражает степень реализации в водоеме эффектов потенциальных отрицательных внешних воздействий и может косвенно отражать уровень интегральной отрицательной трансформации морской экосистемы, а следовательно, остроту экологической ситуации.

3.7. Экологическая значимость территории водосбора для морских акваторий (на примере Охотского моря)

Экологическая значимость водосбора для морских акваторий определяется суммой показателей, отражающих его физико-географические, социально-политические и экономико-хозяйственные особенности, которые должны быть составной частью географо-экологической модели-«портрета» морского водоема. При оценке территории бассейна выделяются следующие показатели:

- гидролого-климатические: густота и особенности речной сети (рис. 3.22), режим осадков и снеготаяния – слой стока с поверхности водосбора (рис. 3.23), определяющие интенсивность и характер поступления загрязняющих веществ (ЗВ) с территории суши в морской водоем;

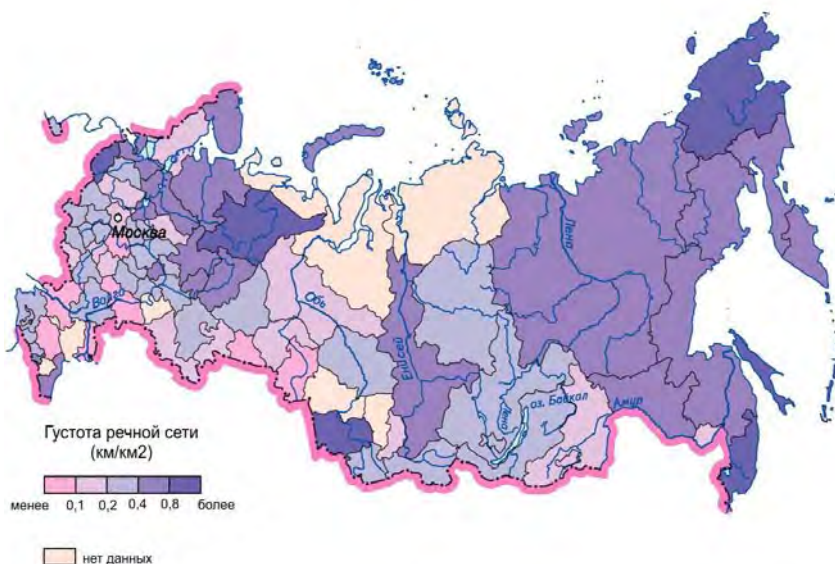


Рис. 3.22. Густота речной сети – суммарная длина рек (км) / площадь водосбора, на территории России [Национальный атлас..., 2008].

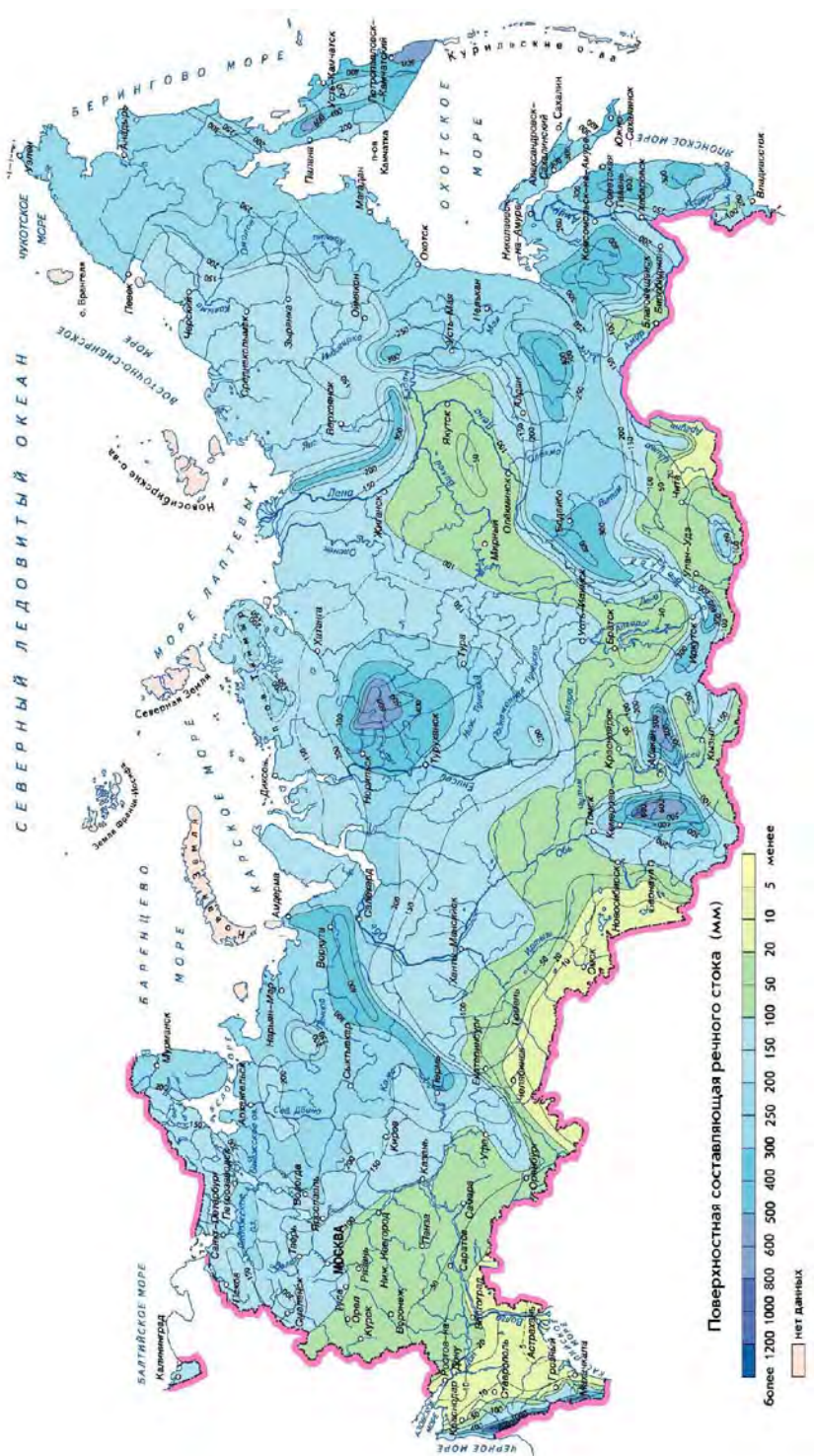


Рис. 3.23. Слой речного стока – суммарный объем речного стока (км^3) / площадь водосбора, на территории России [Национальный атлас..., 2008].

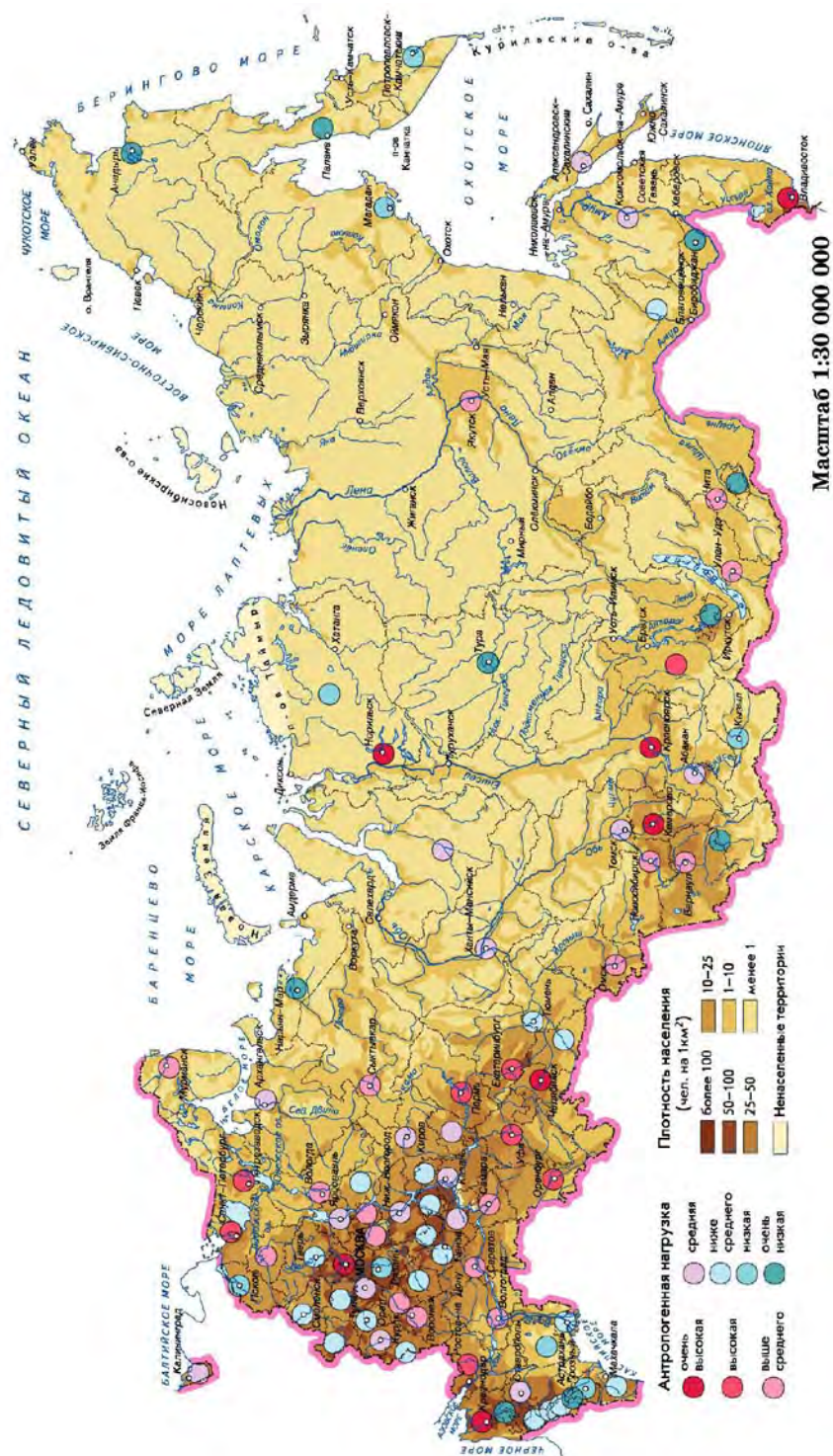


Рис. 3.24. Плотность населения и его нагрузка на территорию различных регионов России [Национальный атлас..., 2008].

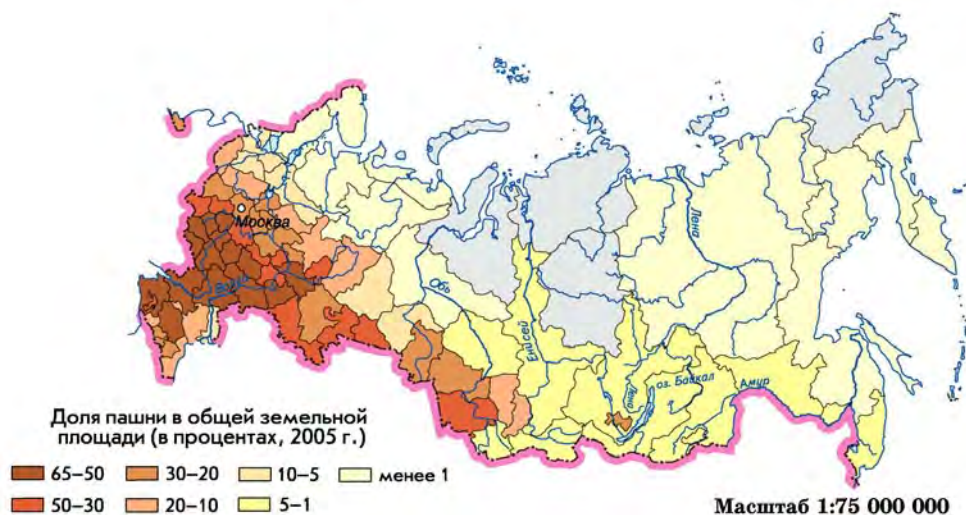


Рис. 3.25. *Распределение пашенных земель по территории России [Национальный атлас..., 2008].*

- административно-территориальные: наличие развитых стран, крупных городов, соотношение сельского и городского населения, его плотность (рис. 3.24), косвенно отражающие потенциальные объемы коммунально-бытовых сточных вод с побережья;

- производственно-хозяйственные: уровень развития, характер промышленного и сельскохозяйственного производства, наличие промышленных предприятий и способы использования земельных ресурсов (рис. 3.25), характеризующие распределение потенциальных источников ЗВ.

Результаты всестороннего анализа этих сведений включают в себя систему обзоров, сводно-аналитических таблиц и диаграмм, фрагментов тематических географических карт, алгоритмов интегральных экологических критериев и оригинальных карт распределения этих показателей по территории конкретного морского водосбора. В качестве примера рассмотрим некоторые из них, проанализированные для водосборных бассейнов различных морей России.

3.7.1. Гидролого-климатические характеристики водосборного бассейна

Речная сеть водосбора Охотского моря. Суммарный сток всех рек в Охотское море – около 600 км³/год (табл. 3.3, рис. 3.26). Самая крупная река – Амур, на долю которой приходится около 65 % материкового стока.

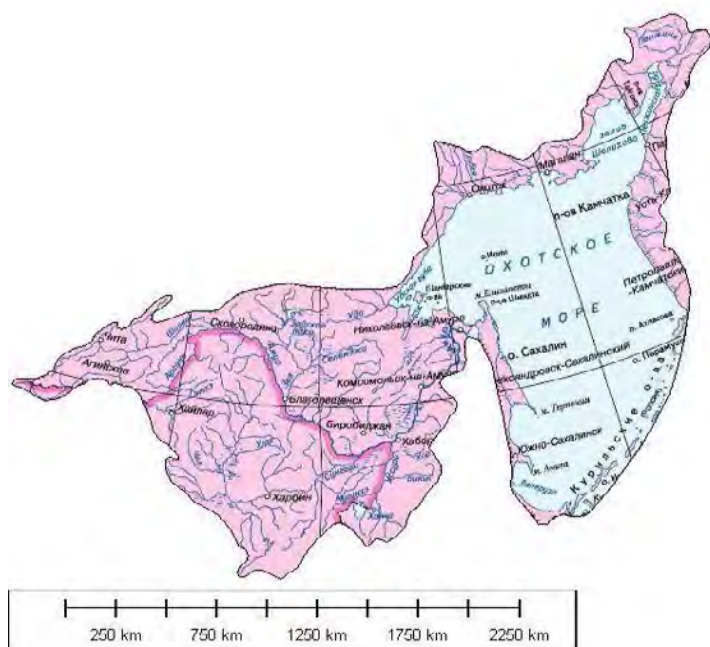


Рис. 3.26. Водосборный бассейн Охотского моря и его речная сеть [Национальный атлас..., 2008].

Водосбор Амура. Река Амур входит в десятку наиболее значительных рек мира: она занимает девятое место по длине и десятое – по площади бассейна. Среди рек Российской Федерации Амур занимает четвертое место по длине, площади водосбора и водности, уступая Енисею, Оби и Лене. Площадь водосбора реки – 1885 тыс. км², из них 1003 тыс. км² входят в пределы России. Водосбор включает в себя Хабаровский и Забайкальский края, Амурскую область и Еврейскую автономную область России, также северо-восточную часть Монголии и северную половину северо-восточной части Китая.

Климат бассейна реки Амур формируется под влиянием как океанических, так и континентальных факторов и наряду с четко выраженными признаками континентального имеет и муссонный характер. Большую часть зимы бассейн занят периферией азиатского антициклона, определяющего холодную солнечную и сухую погоду. Летом бассейн подвержен воздействию тихоокеанского муссона, достигающего наибольшего развития в июле–августе и приводящего к распространению влажных масс морского тропического воздуха вплоть до Забайкалья.

Таблица 3.3.

**Экологически значимые для моря характеристики
основных рек водосбора Охотского моря и их притоков
[Большой словарь, 2003]**

РЕКА	ДЛИНА, км	ПЛОЩАДЬ БАССЕЙНА, тыс. км ²	СРЕДНИЙ РАСХОД, км ³ /год	ОСНОВНЫЕ НАСЕЛЕННЫЕ ПУНКТЫ
АМУР	2820	1855	355	Амурск, Благовещенск, Хабаровск, Комсо- мольск-на-Амуре, Нико- лаевск-на-Амуре, Хэйхэ (Китай)
СУНГАРИ	1870	524		Гирин, Харбин, Цзямусы
АРГУНЬ	1520	232	10,7	Олочи, Нерчинский завод
ЗЕЯ	1242	233	60,4	Зея, Овсянка
УССУРИ	897	193	43,3	Лучегорск, Дальнере- ченск, Лесозаводск, Арсеньев
АМГУНЬ	723	55,5		Могды, Туга, Херпуги, Николаевск-на-Амуре
БУРЕЯ	623	707	27,7	Усть-Умалья, Усть-Ургал
ШИЛКА	555	201	17,4	Чита, Нерчинск, Шилка, Сретенск, Усть-Карск
ПЕНЖИНА	713	73,5	24,8	Аянка, Слаутное, Камен- ское, Манилы, Таловка
УДА	457	61,3	2,7	Удское, Тором, Чумикан
ОХОТА	393	20,2	5,19	Охотск
КУХТУЙ	384	9,2	2,37	Охотск

Основным источником питания Амура служат дождевые осадки, выпадающие в теплое время года. В среднем дождевое питание рек составляет 65–80 % общего объема годового стока, на снеговое приходится 5–20 % и на подземное – 10–20 %. Объясняется это характерной особенностью муссонного климата: резким преобладанием осадков теплого периода (до 90 % годовой суммы осадков) над осадками холодного периода и особенностями рельефа. В данном районе преобладает горный рельеф со значительными уклонами, что и обуславливает быстрое стекание вод.

В горных районах бассейнов **Зей и Буреи** второе место среди источников питания занимают снеговые воды. Роль подземного питания очень мала – 10 %, что объясняется широким распространением многолетней мерзлоты.

В низовьях **Амура и Амгуни** преобладание снегового питания над подземным связано с увеличением снегового покрова по срав-

нению с другими районами. Преобладание подземной составляющей над снеговой отмечено для рек Сихотэ-Алиня и восточного склона Буреинского хребта.

Роль всех типов питания рек Амурского бассейна динамична в течение года. Сроки прохождения половодья меняются по территории во времени, в среднем период половодья приходится на апрель-май. Во время летне-осенних паводков основным источником питания являются дождевые осадки, несколько повышается роль подземного питания и продолжается некоторое поступление талых вод за счет таяния наледей и снега в горах северных районов. Этот период приходится на июль-октябрь. В зимнюю межень единственным источником питания рек становятся подземные воды. Зимний период продолжается в течение ноября-марта, но в южных районах он несколько короче, так как в ноябре на юге Приморья еще идут дожди, а в конце марта начинается сток талых вод. Река Амур покрывается льдом в середине октября, вскрывается в конце мая-начале июня. Пенжинская губа никогда не бывает покрыта сплошным ледяным покровом; этому препятствуют значительные приливные колебания уровня и сильные приливные течения.

Средний многолетний сток воды Амура в вершине устьевой области у села Богородского составляет $324 \text{ км}^3/\text{год}$. По оценкам ВДНИГМИ с учетом боковой приточности Амур при впадении в Амурский лиман имеет средний сток $355 \text{ км}^3/\text{год}$. При выходе в лиман 61 % годового стока Амура поступает в северную часть лимана и 39 % – в южную. Ледовые явления в лимане начинаются раньше, чем на устьевом участке реки. Продолжительность ледостава в лимане меньше, чем в реке, что связано с длительным процессом замерзания лимана. Вскрытие лимана происходит позже, чем на устьевом участке реки.

Максимальный слой стока (90 мм) отмечается на юге п-ва Камчатка. На большей части территории водосбора величина этого показателя составляет 20–40 мм (рис. 3.27).

Река **Пенжина** в Корякском автономном округе берет начало на Колымском нагорье и впадает в Пенжинскую губу Охотского моря. Питается талыми и дождевыми водами. Ледостав – с ноября до конца мая. В нижнем течении находится под влиянием приливов и отливов Пенжинской губы. Приливная волна, входя в Пенжинскую губу из Охотского моря, резко и значительно увеличивает свою величину. В вершине губы величина прилива достигает 13,4 м.

Реки **Охота и Кухтуй** текут почти параллельно друг другу на всем протяжении вдоль Охотского и Кухтуйского хребтов. В нижнем течении реки выходят на широкую долину, сохраняя черты горных водотоков со значительными скоростями течения. Впадая в Охотское море, они образуют единую устьевую систему, состоящую из двух лагун – Охоты и Кухтуя, соединенных между собой Ново-Устьенской протокой, через которую осуществляется водообмен между лагунами. Лагуна р. Охоты сравнительно мала, ее площадь не превышает $4,5 \text{ км}^2$. Русло р. Охоты в нижнем течении раз-

деляется на ряд рукавов наносного происхождения, образуя пойменную многоорукавность. Лагуна р. Кухтуй значительно крупнее, ее площадь составляет около 15 км², она внедряется в сушу на 10 км. При впадении в лагуну русло р. Кухтуй также разделяется на ряд рукавов, проток и стариц. В середине октября на реках появляются ледяные забереги. Ледостав устанавливается в третьей декаде октября.

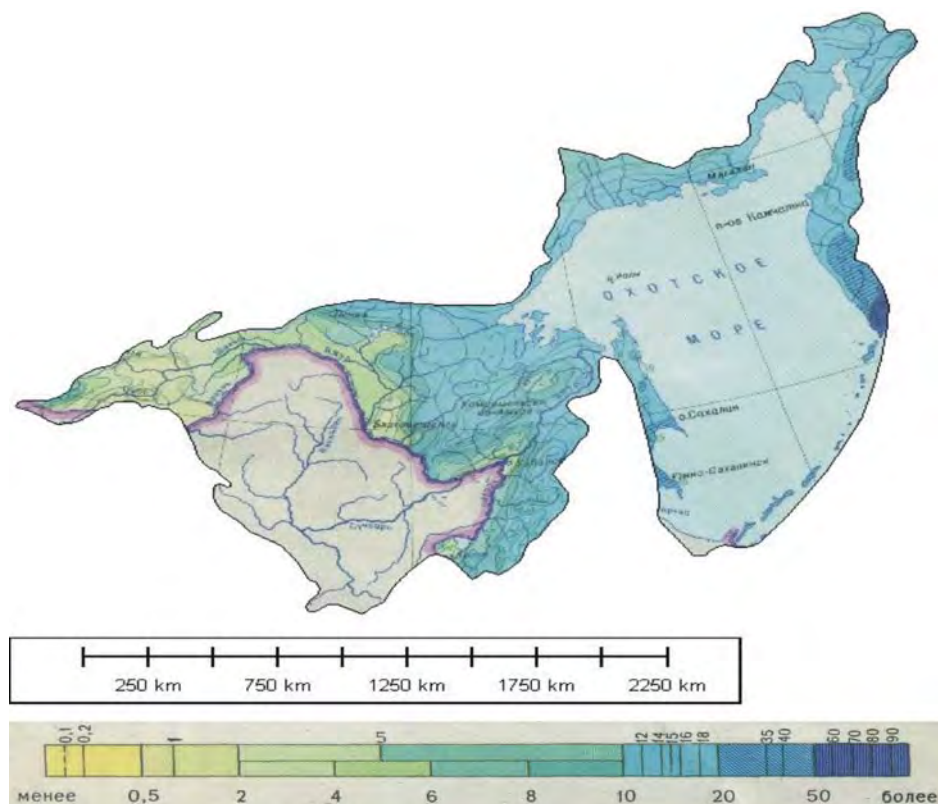


Рис. 3.27. Слой стока (мм) на территории водосбора Охотского моря [Национальный атлас..., 2008].

Река **Сунгари** – крупнейший правый приток Амура, впадает в 288 км выше Хабаровска. Берет начало на плоскогорье Чанбайшань, пересекает Восточно-Маньчжурские горы, имея общее направление с юго-востока на северо-запад. На равнинных участках разбивается на отдельные рукава, меандрирует. Питание преимущественно дождевое, паводки летом, когда часты катастрофические наводнения, а также весной. Ледостав – с ноября до середины апреля. В июне–августе – основной подъем воды.

Река **Аргунь** – правая составляющая Амура. Река течет с западного склона *Большого Хинганского хребта* во *Внутренней Монголии*. Ее слияние с рекой *Шилкой* образует реку *Амур*. На верхнем участке имеет равнинный характер и ширину 30–200 м; на нижнем

участке до устья – типичная горная река с галечно-валунными перекатами шириной до 300 м. Питание реки дождевое. Ледостав – с конца ноября по начало мая.

Река **Зея** – самый крупный левый приток Амура. Берет начало в хребте Токийский Становик. От истока до устья р. Купури Зея – горная река, течет в узкой и глубокой долине; ниже на протяжении 300 км протекает по Верхнезейской равнине в разработанной долине с широкой поймой. Прорезая хребты Тукурингра и Соктахан, образует скалистое ущелье – Зейские Ворота. Ниже устья р. Селемджа течет по Зейско-Бурейской равнине в широкой долине с хорошо разработанными террасами и поймой, сильно заболоченными. Весеннее половодье невысокое. Характерны дождевые паводки, часто катастрофические. Питание преимущественно дождевое (69 %). На долю талых вод приходится около 26 %, подземных – 5 %. Ледостав – с ноября до начала мая.

Река **Уссури** – самая большая водная артерия Приморского края и один из крупных притоков р. Амур. Она берет начало на склонах г. Облачная в горах Сихотэ-Алиня. После вскрытия реки, в конце апреля, начинается весенний паводок, продолжающийся до середины мая. В конце сентября начинается осенний паводок, продолжающийся до октября. В течение теплого периода обычно проходит от двух до шести дождевых паводков, сопровождаемых разливами в среднем и нижнем течении. Ледостав – с конца ноября до начала апреля.

Река **Амгунь** – река в Хабаровском крае, левый приток Амура, образована слиянием рек Сулук и Аякит на склонах Буреинского хребта. В среднем и нижнем течении Амгунь – река равнинная, хотя прорывается через систему Нижнеамурских гор. В бассейне Амгунь широко развита многолетняя мерзлота. Питание преимущественно дождевое. В теплый период бывает до десяти дождевых паводков. Продолжительное половодье (с июня по сентябрь), образующееся рядом паводков; зимой устойчивая межень. Ледостав – с середины ноября до конца мая.

Река **Бурея** впадает в Амур слева, двумя рукавами. Образуется слиянием Правой илевой Буреи. Правая Бурея берет начало на южных склонах хребта Эзоп, левая Бурея – на западных склонах хребта Дуссе-Алинь. Здесь река имеет горный характер, ниже Бурея выходит на Зейско-Бурейскую равнину. Основное питание дождевое. Летом пять-семь паводков, иногда с подъемом уровня воды на 6–10 м.

Река **Шилка** – левая составляющая Амура. Образуется при слиянии рек Онон и Ингода. Течет в глубокой долине между Шилкинским и Амазарским хребтами на севере и Борщовочным хребтом на юге. Течение быстрое; местами Шилка разбивается на рукава или образует перекаты. Питание преимущественно дождевое (80 %). Половодье в июле-августе, часты наводнения. Замерзает в конце октября-начале ноября, вскрывается в конце апреля-первой половине мая.

Река **Уда** берет начало на северном склоне хребта Джагды, протекает в широкой лесистой заболоченной долине, впадает в Уд-

скую губу Охотского моря. Питание преимущественно дождевое. Замерзает в конце октября-ноябре, вскрывается в мае.

Алогичный анализ особенностей гидрологической сети о. Сахалин ждет своего исследователя.

3.7.2. Административно-территориальное деление водосборного бассейна

Водосбор Охотского моря включает территории четырех стран: России, Китая, Монголии и Японии. К субъектам Российской Федерации, входящим в водосбор моря, относятся Камчатский, Хабаровский, Забайкальский и Приморский края, Магаданская, Сахалинская и Амурская области, Еврейская автономная область (табл. 3.4, рис. 3.28–29).

Таблица 3.4.

Социально-административные показатели субъектов Российской Федерации, входящих в водосбор Охотского моря [Большой словарь..., 2003]

Субъект	Площадь, тыс. км ²	Население, тыс. чел.	Плотность населения, чел./км ²	Городское население, %	Главные города
Камчатский край	472,3	402	0,85	80,8	Палана
Магаданская область	462,4	249	0,53	89,7	Магадан
Хабаровский край	788,6	1535	1,9	80,8	Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре, Амурск, Николаевск-на-Амуре, Охотск
Сахалинская область	87,1	620,2	7,1	86,2	Холмск, Корсаков, Невельск, Красногорск, Чехов
Амурская область	363,7	1023	2,8	65,3	Благовещенск, Белогорск, Сковородино, Райчихинск
Забайкальский край	431,5	1276,8	32	64,6	Чита, Нерчинск, Сретенск, Могочи, Шилка, Краснокаменск, Борзи
Еврейская АО	36,3	203	5,7	67,3	Биробиджан
Приморский край	165,9	2216,2	13,4	78	Владивосток, Уссурийск, Спасск-Дальний

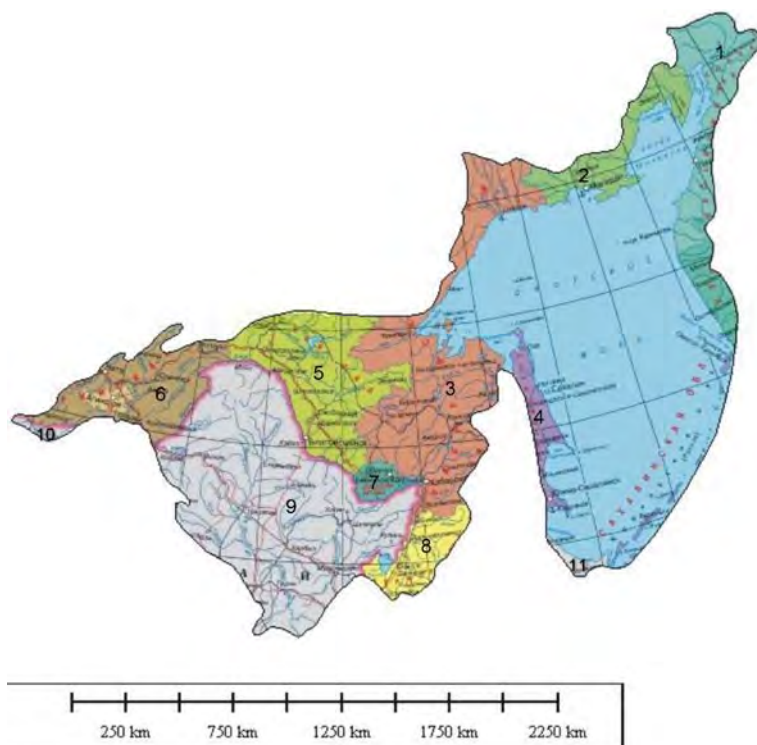


Рис. 3.28. Административно-территориальное деление водосборного бассейна Охотского моря. (1 – Камчатский край, 2 – Магаданская область, 3 – Хабаровский край, 4 – Сахалинская область, 5 – Амурская область, 6 – Забайкальский край, 7 – Еврейская АО, 8 – Приморский край, 9 – Китай, 10 – Монголия, 11 – Япония.)

К субъектам Китайской Народной Республики относятся Автономный район Внутренняя Монголия, Хэйлунцзян и Гирин. К субъектам Монголии относятся Восточный и Хэнтийский аймаки, а Японии – регион Хоккайдо.

Население Российской Федерации, проживающее в бассейне Амура, насчитывает 4,3 млн. чел. Население Китая в настоящее время составляет 50–70 млн. чел., в том числе в бассейне Уссури – 10–15 млн. чел. Приграничное население, тяготеющее непосредственно к Амуру, составляет 1,5–2 млн. чел., а в бассейне р. Сунгари – 45–60 млн. чел. Правительство Китайской Народной Республики в ближайшей перспективе планирует расселение в Амурском бассейне не менее 100 млн. чел.

Максимальная плотность населения (32 чел./км²) зафиксирована в Забайкальском крае. На втором месте по этому показателю оказывается Приморский край (13,4 чел./км²), на третьем – Сахалинская область (7,1 чел./км²). В Магаданской области плотность населения минимальна – 0,53 чел./км² (рис. 3.29).

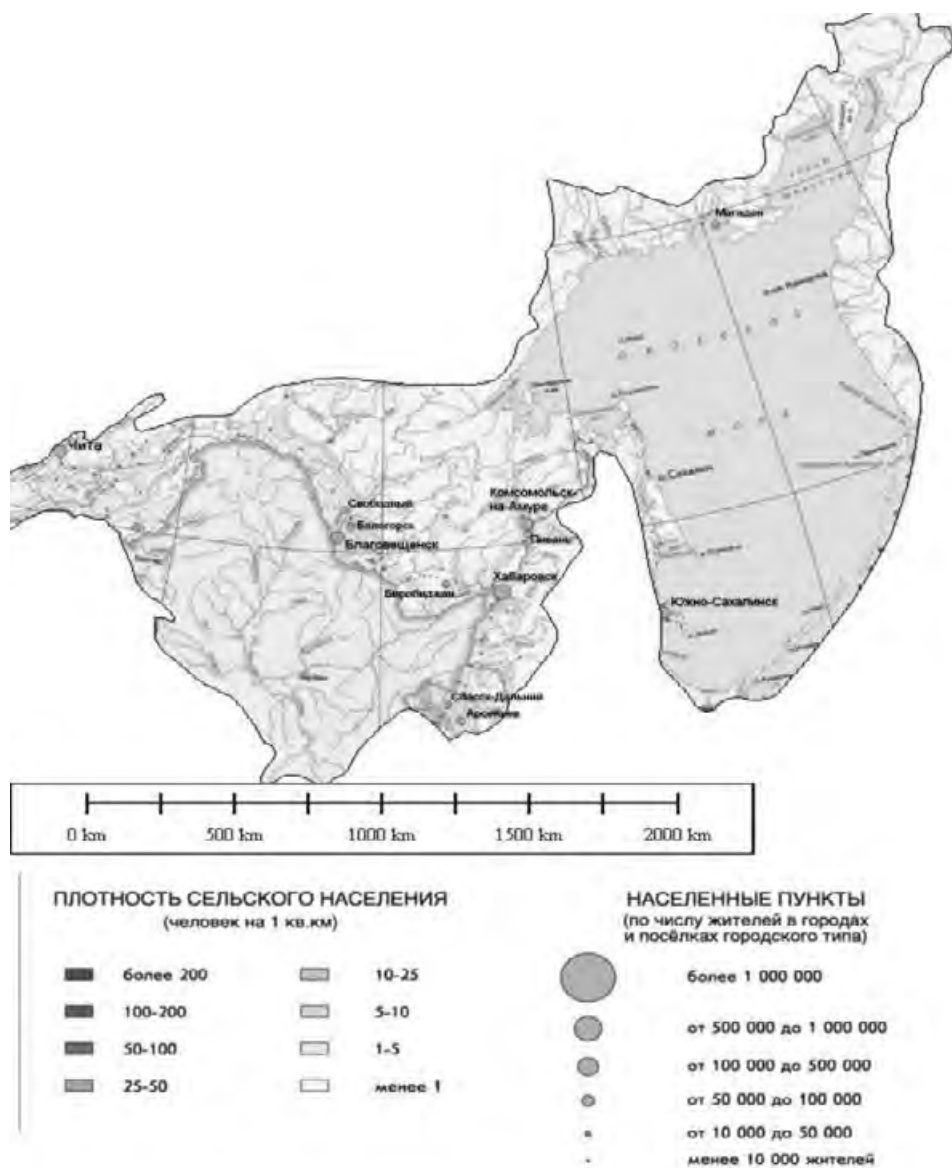


Рис. 3.29. Распределение и плотность населения на территории водосборного бассейна Охотского моря [Национальный атлас..., 2008].

3.7.3. Использование земель, распределение и характер промышленного производства

В административных районах территории водосборного бассейна Охотского моря площади сельскохозяйственных угодий занимают от 0,7 до 5 % площади территории района – Магаданской

и Амурской областей соответственно. При этом пашни занимают от 15 (Камчатка, Магаданская область) до 75 % (Амурская область) общей площади сельскохозяйственных угодий, а пастбища – от 17 (Амурская область) до 95 % (Камчатка) (рис. 3.30).

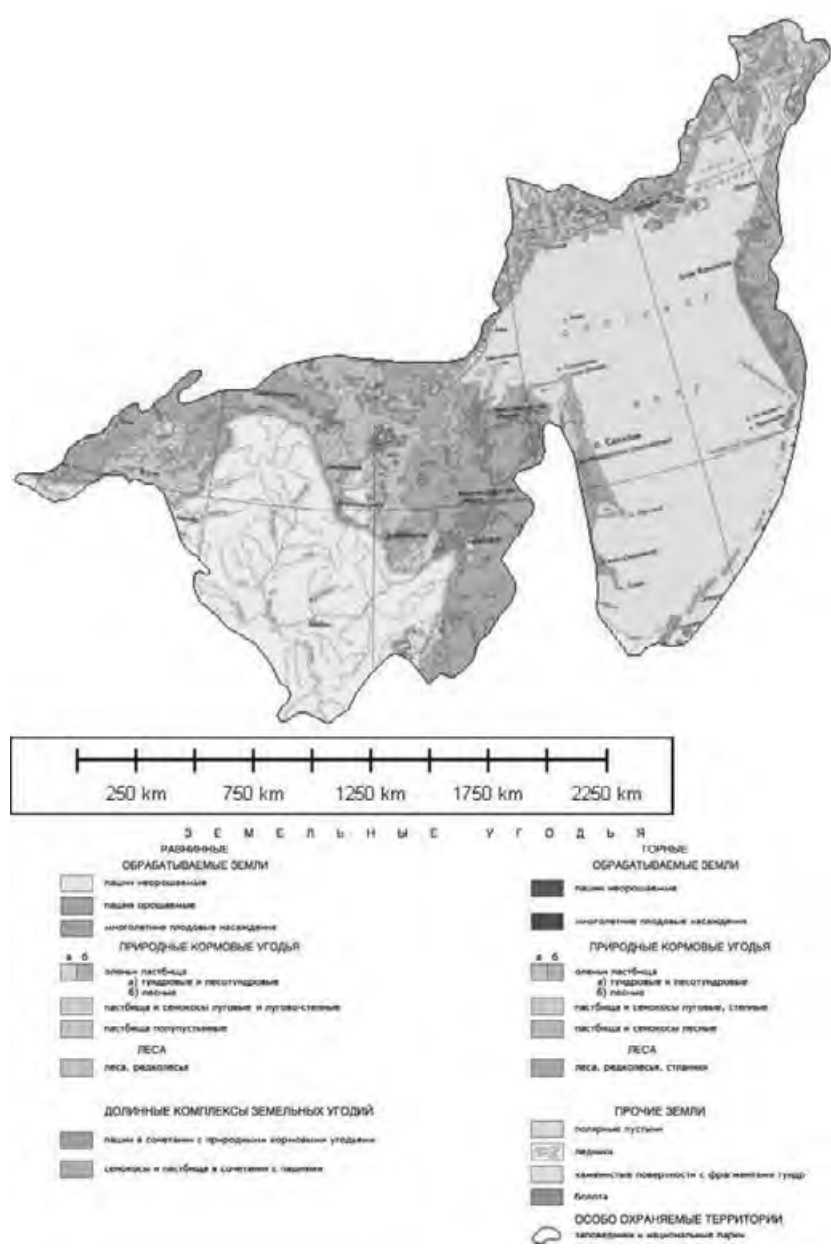


Рис. 3.30. Использование земель на территории водосборного бассейна Охотского моря [Национальный атлас..., 2008].

Сточные воды промышленных предприятий, расположенных на территории морских водосборных бассейнов, в случае их сбросов в речные системы без очистки оказываются мощными источниками консервативных видов загрязняющих веществ для прибрежных зон соответствующих морей. В зависимости от вида промышленного производства содержание консервативных ЗВ в сточных водах предприятий существенно меняется. При этом отходы не всех производств содержат экологически опасные для морских водоемов вещества, а некоторые содержат токсиканты, легко разлагающиеся в водной среде. Итогом проведенного анализа оказались следующие заключения:

1. Из 15 основных отраслей промышленности, включающих более 300 видов производств, в сточных водах предприятий **топливной и строительной** отраслей (более 20 видов производств) консервативных токсичных ЗВ не содержится. *Экологической опасности для морских акваторий эти отрасли промышленности не представляют.*

2. Основными токсикантами, входящими в состав сточных вод всех видов производств **целлюлозно-бумажной промышленности**, являются неконсервативные легкоокисляющиеся в водной среде хлор, метанол и тиолы (диметилсульфид, диметилдисульфид). В этой связи *отходы этой отрасли (в случае если их сброс не осуществляется непосредственно в море) для морских акваторий опасности также не представляют.*

3. Токсические отходы некоторых производств **нефтехимической** (экстракция ароматических углеводородов), **химической** (пр-во лаков и красок, синтетического волокна, магнитной ленты) и **лесотехнической** отраслей промышленности – эфиры (бутилацетат), альдегиды (формальдегид), кетоны (циклогексан и др.), ароматические углеводороды (ксилол, толуол и др.) *имеют экологическое значение для морских гидробионтов в случае, если время достижения их устьев рек не превышает двух-трех месяцев (период окисления ЗВ).*

4. **Максимальные концентрации нефтепродуктов** содержатся в сточных водах заводов *нефтеперерабатывающей и нефтехимической* промышленности: по добыче и первичной подготовке нефти (до 40000 мг/л); по производству битума, бензола, синтетических жирных спиртов, этилена, пропилена, полипропилена (1000–2500 мг/л), а также в отходах рыбокомбинатов (до 2000 мг/л).

5. **Максимальные концентрации детергентов** (200–500 мг/л) содержат отходы метизного производства *черной металлургии* (изготовление проволоки, электродов, стальной ленты, сеток, крепежных изделий), фабрик по обработке шерсти и некоторых других производств *легкой промышленности.*

6. **Максимальные концентрации фенолов** содержат сточные воды предприятий *черной металлургии* – коксохимическое пр-во (до 200 мг/л), *химической* – пр-во синтетического волокна (до 100 мг/л), лаков и красок (до 12460 мг/л) и *легкой* – кожевен-

ные заводы (до 400 мг/л) промышленности.

7. **Максимальные концентрации меди** содержат сточные воды предприятий *цветной металлургии* – пр-во титана и меди при отражательной плавке (200–350 мг/л); *химической* промышленности – пр-во химического волокна (до 300 мг/л), аммиака (до 1000 мг/л); *машиностроения* – пр-во автомобилей и шарикоподшипников, приборостроение (до 100 мг/л), а также всех видов производств *электронной* промышленности (до 270 мг/л) и автомобильные заводы (до 400 мг/л).

8. **Максимальные концентрации свинца** содержатся в сточных водах предприятий *цветной металлургии* – пр-во серной кислоты (до 2860 мг/л) и *электротехнической* промышленности – пр-во источников тепла (100–300 мг/л).

9. **Максимальные концентрации цинка** содержатся в сточных водах предприятий *цветной металлургии* – пр-во меди (220–850 мг/л) и серной кислоты (230 мг/л); *машиностроения* – гальваническое и травильное пр-во (150 мг/л), приборостроение (до 100 мг/л) и *электротехнической* промышленности – пр-во электродвигателей (200–400 мг/л), конденсаторного оборудования (более 100 мг/л).

10. **Максимальные концентрации хрома** содержатся в сточных водах предприятий *химической* – пр-во пигментов (100 мг/л); *легкой* – кожевенные заводы (190 мг/л); *электротехнической* – пр-во электродвигателей (60–160 мг/л), конденсаторного оборудования (до 600 мг/л), полупроводниковых приборов (100 мг/л); всех видов производств *электронной* промышленности (2400 мг/л), а также автомобильных, шарикоподшипниковых и приборостроительных заводах промышленности *машиностроения* (до 200 мг/л).

11. **Основным антропогенным источником кадмия** для речных и морских вод являются отходы предприятий *электротехнической* промышленности, производящих источники тепла (100–300 мг/л), электродвигатели (до 175 мг/л) и силовые полупроводниковые приборы (130 мг/л).

12. **Основным антропогенным источником мышьяка** для водной среды оказываются предприятия *цветной металлургии*, производящие различные виды меди (от 140 до 1000 мг/л), а также свинца и серной кислоты (до 0,15 мг/л).

13. **Основными антропогенными источниками марганца** для водной среды оказываются предприятия *цветной металлургии*, производящие титан (45 мг/л), а также *нефтехимической* промышленности, производящие синтетические жирные кислоты (20 мг/л).

14. Кроме указанных источников конкретных ТМ, различные виды этих микроэлементов могут содержаться (от 100 до 300 мг/л) также в сточных водах лакокрасочных, станкоинструментальных и заводов химического и нефтяного машиностроения соответствующих отраслей промышленности.

15. Некоторые виды производств **химической** (заводы синтетического волокна) и **электротехнической** (заводы электродви-

гателей) промышленности, **машиностроения** (гальваническое и травильное пр-во, автомобилестроительные, шарикоподшипниковые и приборостроительные заводы), а также все предприятия **электронной** промышленности содержат в сточных водах яды *цианиды* в концентрациях от 10 до 400 мг/л.

Отдельное место в представленном перечне экологически опасных для моря производств занимают предприятия коммунального хозяйства, имеющиеся практически во всех крупных городах водосбора и являющиеся мощными источниками в основном детергентов для природных вод.

Для водосборного бассейна Охотского моря наиболее напряженное санитарно-техническое состояние земель водного фонда и водоохранных зон связано с размещением здесь промышленных и сельскохозяйственных предприятий, хозяйственно-бытовых отходов крупных населенных пунктов, объектов теплоэнергетики, железнодорожного транспорта, горнодобывающей и лесной промышленности.

В Забайкальской области в пределах земель водного фонда расположены предприятия и свалки городов Читы, Нерчинска, Сретенска, Шилки, Могочи, Краснокаменска, Борзи.

В Амурской области неблагоприятными зонами в границах водного фонда являются районы размещения городов Благовещенска, Шимановска, Свободного, Белогорска, Тынды, Райчихинска, Сковородино, Магдагачи. Нижние течения Зеи и Буреи являются зонами производства продукции растениеводства и животноводства. Распаханность водоохранных зон таких рек, как Белая, Пера, Грязная, достигает 50–70 %. На берегах Ивановки, Куприяновки, Райчихи, Белой, Димы и Перы размещены склады удобрений и ядохимикатов. В верховьях Буреи в водоохранных зонах расположены объекты золотодобычи.

В Еврейской автономной области зонами концентрации промышленного производства являются города Биробиджан и Облучье. В низовьях рек Биджан, Добрая, Вертопрашиха, Унгун значительную долю занимают распаханные земли, имеются склады удобрений и ядохимикатов. В верховьях рек Хинган и Бира расположены горнодобывающие предприятия.

В Хабаровском крае наиболее крупные промышленные комплексы, оказывающие влияние на водоохранную зону Амура и его притоков, сосредоточены в Хабаровске, Комсомольске-на-Амуре, Николаевске-на-Амуре, Амурске. В пригородной зоне Хабаровска в пределах земель водного фонда расположены крупные животноводческие комплексы («Некрасовский», «Дружба») и птицефабрики. Водоохранные зоны рек бассейна р. Сита в пределах сельскохозяйственных районов, как правило, распаханы и мелиорированы.

В бассейне р. Усури наиболее существенное влияние на режим водоохранных зон оказывают города Лучегорск, Дальнереченск, Лесозаводск, Арсеньев.

Доля сбрасываемых сточных вод энергетики составляет 43,7 %

общего сброса: в Забайкальской области – 30,2 %, Амурской – 43, Хабаровском крае – 42,2, Приморском – 45,6 %.

На долю загрязненных вод приходится 72,7 % общего сброса. В целом по сравнению с 1991 г. объем сброса загрязненных вод изменился мало, однако по территориям можно отметить существенные изменения. Так, в Хабаровском крае количество загрязненных вод уменьшилось на 27,4 %, в Еврейской автономной области – на 37,4 %, а в Амурской области объем загрязненных вод увеличился на 71 %.

Мощность очистных сооружений в Амурском бассейне, за исключением Приморского края, соответствует или перекрывает потребности в очистке сточных вод: в Еврейской автономной области на 86 %, в Хабаровском крае – на 39 %. Несмотря на это, в целом по бассейну очищается только 5,8 % сточных вод, что объясняется низким техническим состоянием и перегрузкой очистных сооружений, а также устаревшими технологиями очистки.

3.7.4. Интегральные критерии экологической значимости территории водосбора для морского водоема

Для районирования территории водосбора по уровню ее экологической значимости для морской акватории и наглядного представления этой информации можно использовать несколько интегральных критериев, включающих указанные особенности.

1. **Отношение плотности населения к величине среднегодового стока с водосбора** позволяет оценить *уровень антропогенной нагрузки водных ресурсов его территории* – установить, какое количество населения приходится на единицу объема пресного стока. Однако сочетание гидролого-климатических и социальных факторов, определяющее высокие значения этого критерия, не всегда совпадает с характером размещения промышленного производства. Многие крупные промышленные районы с высокой плотностью населения могут располагаться в зонах с также высоким среднегодовым стоком. В этом случае величина показателя оказывается здесь незначительной, хотя значимость этих территорий для моря, тем не менее, не вызывает сомнений. Таким образом, районы с максимальными величинами критерия антропогенной нагрузки водных ресурсов должны рассматриваться лишь как *зоны повышенной вероятности развития опасных для морского водоема явлений*.

2. Сточные воды промышленных предприятий, расположенных на территории морских водосборных бассейнов, в случае их сбросов в речные системы без очистки оказываются мощными источниками консервативных видов загрязняющих веществ для прибрежных зон соответствующих морей. Для восстановления картины возможных первопричин современного уровня загрязнения морских вод, грунтов и морских гидробионтов загрязня-

ющими веществами производится параллельный анализ их содержания в неочищенных сточных водах предприятий различных отраслей промышленности (табл. 3.5) и характера распределения промышленного производства по территории морского водосбора. Результаты такого анализа позволяют ранжировать различные виды производств по их экологической значимости для морской акватории и служат основой для районирования территории водосбора по степени потенциальной экологической опасности для морской акватории (как источника загрязнения отходами промышленности).

Коэффициент потенциальной экологической опасности промышленного производства водосборного бассейна для морской акватории (ПЭО). Критерием потенциальной экологической опасности для морских акваторий промышленного производства городов побережья и основных рек берется сумма отношений концентрации токсичного ЗВ в сточных водах к его ПДК в морской водной среде – *суммарное количество максимальных величин ПДК всех исследуемых консервативных токсикантов, содержащихся в сточных водах производств соответствующего города.*

Таблица 3.5.

Характеристика производств, неочищенные сточные воды которых содержат консервативные токсические вещества [Фащук и др., 1999]

№ п/п	Отрасль промышленности	Количество видов производств	Вид производства	Вид загрязняющего вещества (концентрация в мг/л)
1	2	3	4	5
1.	Топливная	5	Все	Не содержат
2.	Топливно-энергетическая	1	Тепловые электростанции	Масла, смолообразующие продукты (50)
3.	Черная металлургия	14	1. Доменное пр-во	Нефтепродукты
			2. Прокатное пр-во	Нефтепродукты (60–100)
			3. Пр-во безуглеродного феррохрома	Cr ⁺⁶ (11–17)
			4. Метизное пр-во (провода, электроды, ленты, сетки, крепежные изделия)	СПАВ (305), N (7)
			5. Коксохимическое	Нефтепродукты (100), фенолы (200)

Продолжение таблицы 3.5.

№ п/п	Отрасль промышленности	Количество видов производств	Вид производства	Вид загрязняющего вещества (концентрация в мг/л)
1	2	3	4	5
4.	Цветная металлургия	10	1. Обоганительные фабрики	Ионы ТМ, нефтепродукты
			2. Пр-во свинца	Pb (0,5), Zn (0,6), As (0,12)
			3. Пр-во титана	Cu (190), Cr (45), Mn (45)
			4. Пр-во анодной меди	Cu (40), Zn (850), Pb (20), As (190)
			5. Пр-во катодной меди	Cu (200), Zn (215), Pb (5), As (1000)
			6. Пр-во анодной и катодной меди при отражательной плавке	Cu (350), Zn (220), Pb (7), As (140)
			7. Пр-во H ₂ SO ₄	Cu (20), Zn (230), Pb (2860), As (0,15)
5.	Нефтегазовая	5	1. Нефтепромыслы и первичная подготовка нефти	Нефтепродукты (20–40000)
			2. Газодобывающие предприятия	Масла (50–100), газоконденсат (200–300)
6.	Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая	13	1. Нефтеперерабат. заводы (все виды нефтепереработки кроме пр-ва битума)	Нефтепродукты (от 30–50 до 100–300)
			2. Пр-во битума	Нефтепродукты (1000–1500)
			3. Экстракция ароматических углеводородов	Ароматические углеводороды (20–100)
			4. Нефтехимические предприятия (пр-во бензола, высших и синтетич. жирных спиртов, этилена, пропилена, полиэтилена)	Нефтепродукты (1000–2500), фенолы (от 3–5 до 25–30)
			5. Пр-во синтетич. жирных кислот	Cr (2,7), Cu (0,5), Mn (20)
			6. Пр-во резины	Масла (до 5)
			7. Пр-во сажи	

Продолжение таблицы 3.5.

№ п/п	Отрасль промышленности	Количество видов производств	Вид производства	Вид загрязняющего вещества (концентрация в мг/л)
1	2	3	4	5
7.	Химическая	80	1. Апатитовые, фосфоритовые рудники и обогатит. фабрики	СПАВ (3–15 мг/л)
			2. Пр-во аммиака	Нефтепродукты (50–200), Cu (1000)
			3. Пр-во ацетилена	Нефтепродукты (15), фенолы (17–21)
			4. Пр-во лаков и красок	ТМ (300), дифенилолпропан (7000), циклогексанон (50000), толуол и ксилол (700), фенолы (12460)
			5. Пр-во пигментов	Pb (50), Cr (100), CrO ₃ (2000), ZnO (300–500)
			6. Пр-во хим. волокна	Zn (38), Cu (287)
			7. Пр-во синтетич. волокна	СПАВ (5–15), формальдегид (10–15), CN (20–30), метанол (70), фенолы (30–100)
			8. Пр-во магнитной ленты	Бутилацетат (5), циклогексан (5), ацетон (10)
8.	Лесная, деревообрабатывающая и лесотехническая	15	1. Пр-во фанеры, древесно-струж. плит	Формальдегид (160)
			2. Лесохимическое пр-во (растворители, смолы, кислоты)	Фенолы (5–390), Cu (2–9), метанол (190–6400)
9.	Целлюлозно-бумажная	8	1. Ректификация сульфатного скипидара	Метанол (200), диметилсульфид и диметилдисульфид (120)
10.	Легкая	23	1. Обработка шерсти	СПАВ (500)
			2. Пр-во шелковых и хлопчатобум. тканей	СПАВ (20–60)
			3. Камвольно-суконные комбинаты	СПАВ (65)
			4. Камвольно-прядельные фабрики	СПАВ (40), Cr (3)
			5. Кожевенные з-ды	N (260), Cr (190), фенолы (до 407), СПАВ (200)

Продолжение таблицы 3.5.

№ п/п	Отрасль промышленности	Количество видов производств	Вид производства	Вид загрязняющего вещества (концентрация в мг/л)
1	2	3	4	5
11.	Хлебопродуктовая, мясо-молочная, рыбная, пищевая	45	1. Рыбокомбинаты	Масла (120–1940), фенолы (1)
12.	Машиностроение	15	1. Станкостроит. и инструментальные заводы	ТМ (50–100)
			2. Химическое и нефтяное машиностроение	Ионы ТМ (80)
			3. Пр-во автомобилей и шарикоподшипников	Нефтепродукты (300), Cr (10–200), CN (10–400), Cu (100), Zn (100), Ni (100)
			4. Сельхозмашины	Нефтепродукты (50–9550)
			5. Гальваническое и травильное пр-во	Zn (80–150), CN (1–5), Cr (3–46)
			6. Приборостроит. заводы	Cr (5–180), Cu (80), Cd (5), Zn (100), Pb (1,5), CN (100)
13.	Электротехническая	18	1. Пр-во трансформаторов	Cr (14), Zn (13), Cu (3), СПАВ (50)
			2. Пр-во хим. источников тепла	Pb (100–300), Cd (100–300), СПАВ (3)
			3. Пр-во электродвигателей	Cu (7), Cd (14), Zn (192), Cr (60)
			4. Пр-во крановых и тяговых электродвигателей	Zn (400), CN (160), Cd (175), Cr (156)
			5. Пр-во конденсаторного оборудования (гальваническое)	Cu (91), Zn (111), Cd (8), Cr (596)
			6. Пр-во силовых полупроводниковых приборов	Cu (9), Cd (131), CN (16), Cr (100)
14.	Электронная	7	Все виды	Cu (0,5–270), CN (70), Zn (3–30), Cr (2400)
15.	Строительная	19	Все виды	Не содержат

Продолжение таблицы 3.5.

№ п/п	Отрасль промышленности	Количество видов производств	Вид производства	Вид загрязняющего вещества (концентрация в мг/л)
1	2	3	4	5
16.	Прочие отрасли промышленности	15	1. Авторемонтные заводы	Сг (4–125000), ПАВ (180–700), Сu (384)
			2. Ремонт бытовых машин и приборов	Сг (10), Сu (16), ксилол (15), формальдегид (2)
			3. Пошив и ремонт обуви	Бутилацетат (35), ацетон (10), толуол (20)

После выполнения соответствующих расчетов величины коэффициента ПЭО для каждого из проанализированных городов водосбора и морского побережья в виде диаграмм наносятся на карту водосборов. Удельный вес каждого компонента загрязнения рассчитывается из простой пропорции и также наносится на диаграмму – представляется возможность наглядно оценить пространственное распределение показателя ПЭО и его структуры по территории исследуемых водосборов. Такие расчеты, проведенные для бассейнов Черного и Азовского морей, представлены на рис. 3.31. По рисунку можно легко оперативно оценить: сброс какого токсиканта и в каком городе может оказаться наиболее опасным, если сточные воды не пройдут соответствующую очистку, и в этом плане сравнить исследуемые города.

Так, например, из рис. 3.31 следует что:

1. **По нефтяным углеводородам** наиболее опасные для Черного и Азовского морей производства располагаются в *Севастополе, Новороссийске, Батуми* (доля НУ в структуре индекса ПЭУ здесь составляет более 40 %). Вклад этого токсиканта в суммарную величину ПЭО в *Трабзоне, Бургасе, Варне, Могилеве, Херсоне* также значителен и превышает 20 %.

2. **По детергентам** из всех исследуемых городов несколько выделяются *Варна и Констанца*, где доля этого токсиканта в суммарной величине индекса ПЭО достигает 8 %.

3. **Вклад фенолов** в величину показателя ПЭО преобладает в городах: *Одесса (98 %), Стамбул (63), Линц (55), Вена (30), Будапешт (53), Белград (76), Тирасполь (39), Могилев (34), Киев (95), Черкассы (74), Днепродзержинск (46), Днепропетровск (97), Запорожье (63), Никополь (68), Николаев (66), Ростов-на-Дону (49) и в Краснодаре (49 %).*

4. **По значительной доли меди** выделяются сточные воды производств *Севастополя (32 %), Керчи (54), Новороссийска (29), Трабзона (28), Самсуна (68), Зонгулдака (59), Варны (63), Констанцы (63), Братиславы (27), Тирасполя (23), Могилева (20), Кременьчуга (52) и Днепродзержинска (46 %).*

5. **По свинцу** из всех исследуемых городов несколько выделяются *Новороссийск* (14 %), *Трабзон* (15), *Братислава* (14 %).

6. **По хрому** существенный вклад в величину показателя ПЭО отмечен в *Севастополе* (22 %), *Керчи* (27), *Бургасе* (33), *Братиславе* (28), *Будапеште* (31), *Тирасполе* (24), *Кременьчуге* (29), *Херсоне* (55), *Ростове-на-Дону* (29) и *Краснодаре* (29 %).

7. **По цинку** не выделяются производства ни одного города. Только в *Самсуне* доля этого токсиканта в величине индекса ПЭО составляет 10 %.

Аналогичные расчеты и оценки для городов водосборного бассейна Охотского моря и его территории на о. Сахалин также ждут своих исследователей.

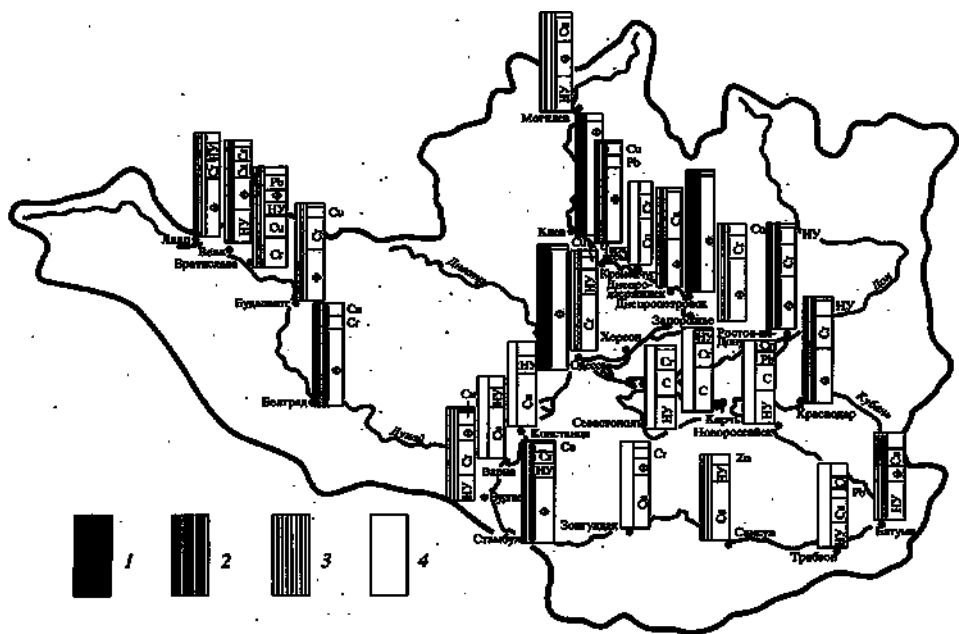


Рис. 3.31. Коэффициент потенциальной экологической опасности для моря сточных вод промышленных предприятий водосборного бассейна Черного моря. Шкала логарифмическая.

1 – 4 > 1; 0,5 > 1; 0,1 > 0,5; < 0,1 млн. ПДК соответственно.

3.8. Выводы

Таким образом, параллельно с традиционными приемами обобщения данных для решения задач морской экологии их анализ должен производиться на базе информационной модели, представляющей комплекс географо-экологических аспектов изучения системы «море–водосбор» различными науками. Логическая схема исследования включает ряд операций: отбор, «сворачивание», анализ и

наглядное представление информации, ранжировка процессов по экологической значимости, выявление и картографирование неблагоприятных для жизни моря последствий. Для этого разрабатывались алгоритмы экологических показателей и методы морского экологического картографирования, с помощью которых многочисленные цифровые и картографические материалы «сворачивались» в аналитические таблицы и диаграммы, морские диагностические экологические карты и генеральные карты-схемы.

Реализация предложенных методологических принципов географо-экологического подхода позволяет:

- *создать теоретическую и информационную базу* перспективных разработок и расчетов интегральных критериев оценки состояния морских экосистем в условиях хозяйственной деятельности;

- *систематизировать экологическую информацию* по любому водоему Мирового океана, используя структуру информационной базы, методологические и методические принципы составления его географо-экологической модели-«портрета»;

- *оперативно оценить возможные причины* развития кризисных ситуаций в море, сузить зону их оперативного поиска, разработать научно обоснованные природоохранные мероприятия на основании параллельного анализа карт и описаний «портрета»;

- *оперативно оценить возможные последствия* катастрофического воздействия на морскую экосистему (залповый сброс загрязняющих веществ с речным стоком или со стоками предприятий побережья, при авариях танкеров или нефтепроводов) для популяций промысловых гидробионтов, сориентировать промышленность при планировании освоения морских биологических ресурсов;

- *оценить остроту экологической ситуации* в водоеме после установления ее градаций по соотношению коэффициентов потенциальной экологической опасности и реакции экосистемы на внешнее воздействие;

- *разработать прогноз* возможных экологических изменений в прибрежных районах моря в случае нарушения режима очистки сточных вод на основании анализа карты потенциальной экологической опасности промышленного производства на территории водосбора для морских акваторий.

Основу полученной информационной геоэкологической модели морского водоема составляют:

- ретроспективные карты палеогеографических реконструкций древних бассейнов;
- интегральная карта-схема распределения жизни в водоеме;
- интегральная карта-схема основных природных факторов, формирующих условия среды в водоеме;
- интегральная карта-схема распределения форм антропогенного воздействия на черноморскую экосистему и его негативных последствий;

- карта распределения антропогенной нагрузки на водные ресурсы морского водосборного бассейна;
- карта распределения показателя потенциальной экологической опасности промышленных предприятий побережья для морских акваторий и его структуры.

Предложенная модель позволяет формализовать для географо-экологического прогноза причинно-следственные экологические связи, возникающие в геосистеме «море – водосборный бассейн», под влиянием природных и антропогенных факторов:

√ районировать акваторию по показателю «уязвимости» промысловых организмов к внешним воздействиям, выделив центры концентрации их жизни на разных стадиях развития;

√ оценить оптимальные условия среды для обитания различных видов гидробионтов и приоритетные природные факторы, их формирующие;

√ выявить в море районы с аномальным содержанием загрязняющих веществ в воде, грунтах и гидробионтах, установить масштабы и структуру этих аномалий;

√ оценить уровень и структуру антропогенной нагрузки загрязняющими веществами различных районов шельфа, а также отдельных рек бассейна;

√ районировать водосбор по показателю антропогенной нагрузки на его водные ресурсы и выделить наиболее опасные для моря районы по сочетанию социальных (плотность населения) и климатических (речной сток) факторов;

√ районировать побережье моря и основных впадающих рек по величине и структуре показателя потенциальной экологической опасности производств, выделив здесь города, промышленные предприятия которых содержат в сточных водах консервативные токсические вещества.

Параллельный анализ наборов карт, диаграмм и описаний модели позволяет сократить время оценки возможных причин развития кризисных ситуаций в море или сузить зону их поиска. Кроме того, аналогичным образом можно решить и обратную задачу – предсказать возможные изменения условий среды и состояния гидробионтов в случае развития природных аномалий или под влиянием активизации хозяйственной деятельности на морской акватории и водосборе.

Учитывая значительный объем и разнообразие данных, анализируемых при разработке географо-экологической модели морского водоема, трудно исключить вероятность пропуска при этом тех или иных экологически значимых результатов. В этой связи очевидна возможность дальнейшего обогащения получаемой информационной модели по мере получения новых знаний в различных областях морской науки или в процессе анализа географо-экологических аспектов уже имеющейся информации для дальнейшего использования ее как основы при реализации математических моделей.

Вопросы

1. Виды морской экологической информации и в чем состоят их качественные отличия?
2. Каковы основные принципы географо-экологического подхода к систематизации и анализу морской экологической информации?
3. Определение и структура геоэкологической информационной модели морского водоема.
4. В чем состоит отличие геоэкологического моделирования от традиционных способов систематизации морской информации?
5. Интегральные показатели остроты экологической ситуации в водоеме.
6. Способы «сворачивания» информации для наглядного представления в оперативных целях.
7. Основные экологически значимые для моря показатели водосборного бассейна и способы их наглядного представления.
8. Какие практические результаты дает геоэкологическое моделирование морских водоемов?

Глава 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ: ГЕОГРАФО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Благодаря усилиям классиков современного естествознания, в ходе истории его развития формировалась качественная модель окружающего мира. Так, В. И. Вернадский заложил основы учения о живом веществе и морской геохимии, А. П. Виноградов начал изучать химический состав микроорганизмов, Н. М. Книпович был пионером рыбопромысловых исследований морей и солоноватых вод, С. В. Бруевич разработал аналитические методы морских гидрохимических работ, сформулировал основы гидрохимии, биогидрохимии и химической динамики морей, Л. А. Зенкевич изучал фауну и биопродуктивность морских вод, А. Б. Скопинцев начал исследования биогенных и органических веществ в водоемах и водотоках, Г. Г. Винберг обращался к вопросам формирования биологической продуктивности морей.

Эти работы послужили методологическим и теоретическим фундаментом начавшихся во всем мире со второй половины XX века регулярных исследований экологического состояния морских экосистем, гидрохимических особенностей формирования сырьевой базы и биопродуктивности природных вод; закономерностей развития химико-биологических процессов трансформации и распада органического вещества (ОВ); механизмов регенерации биогенных субстратов в связи с изучением условий оборачиваемости и круговорота веществ в биосфере, а также способов систематизации и анализа полученной информации.

4.1. Типы математических моделей морских экосистем

По выражению известного математика, академика И. М. Яглома: *«Уровень зрелости той или иной дисциплины в значительной мере определяется степенью использования в ней математического аппарата, содержательностью присущих дисциплине “математических моделей” и тесно с ними связанных дедуктивных выводов...»*.

Ко второй половине XX века морская экология созрела как наука до такой степени, что математическое моделирование состояния морских экосистем стало самостоятельным научным направлением в естествознании. В его рамках Мировой океан рассматривается как сложная динамическая система физических, химических, биологических, геологических и других процессов. Развитие средств вычислительной техники и аппарата прикладной математики привело к интенсивной разработке математических

моделей морских экосистем, которые позволили систематизировать полученные знания в различных областях морской науки с целью прогноза и управления состоянием морских водоемов. Сегодня математические модели морских экосистем наряду с полевыми наблюдениями в море стали фундаментом научного понимания природы океана. Для наглядного представления структуры огромного парка типов математических моделей, разработанных в разных странах мира с целью формализации недоступных для прямого инструментального измерения природных процессов или показателей морской среды, В. М. Пищальник составил сводную аналитическую таблицу их видов (рис. 4.1).

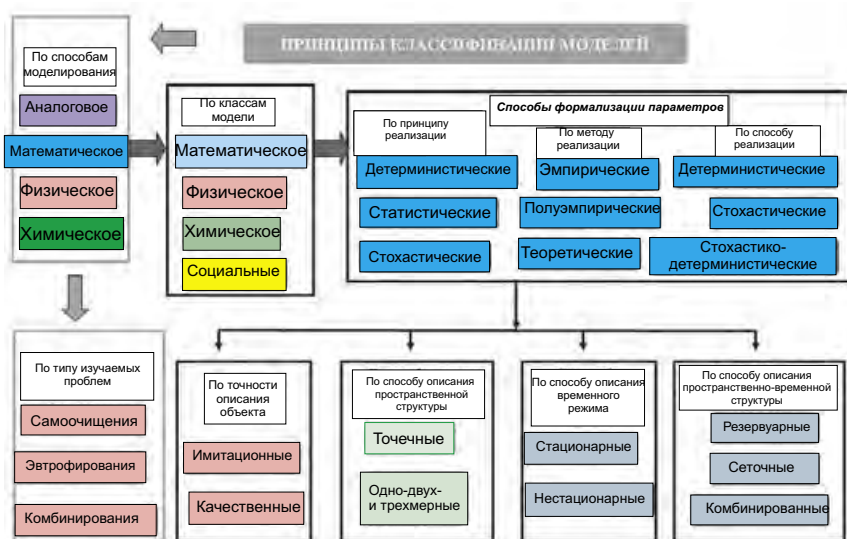


Рис. 4.1. Структура парка математических моделей, используемых в эколого-географических исследованиях.

В зависимости от целей моделирования их можно подразделить на **имитационные**, приуроченные к конкретным бассейнам или районам и разрабатываемые для конкретных целей, и **качественные**, теоретические, используемые для выяснения общих закономерностей развития и анализа процессов. В имитационных моделях стремятся учесть максимум деталей, а в качественных – минимум, но наиболее важных, поэтому для них главная проблема – выбор приоритетных переменных.

По способу реализации модели делятся на **детерминистические**, в которых для связи между переменными используются функциональные зависимости, и **стохастические** – на основании статистических связей. Первые из них используются чаще, так как допускают бесконечное множество компонентов и не учитывают случайных колебаний параметров среды. Они удобны с точки зрения интерпретации результатов. Существуют также **стоха-**

стико-детерминистические модели, в которых на первом этапе решение ищется детерминистически, а затем с помощью метода статистических испытаний моделируется изменчивость различных параметров и исследуется реакция решения на эту изменчивость.

По способу представления пространственной структуры явления модели делятся на **точечные** (параметры сосредоточены в точке), **резервуарные** (распределение параметров ограничено границами – стенками бокса) и **непрерывные** (параметры имеют реальное пространственное распределение).

В точечной модели проводится полное интегрирование характеристик по всему объему рассматриваемой области. В резервуарной модели элемент физического пространства, описываемый осредненными по нему (сечение реки, слой океана) характеристиками, называется *резервуаром* (боксом), а в пространстве состояния (звено пищевой цепи, взвесь, растворенное вещество) – *блоком*. Передачу свойств от одного резервуара к другому принято называть *поток*ом, а из одного блока в другой – *переход*ом.

В резервуарных моделях рассматриваемый объем разбивается на отдельные резервуары, для каждого из которых учитывается лишь средняя по нему концентрация вещества и строится точечная модель. Это позволяет более или менее грубо учесть пространственную неоднородность и выделить какие-либо структурные объекты. Основным достоинством резервуарных моделей является простота их реализации, хотя в реальной природе трудно выделить репрезентативную систему резервуаров и приписать им надлежащие значения параметров. Кроме того, они чувствительны к малым колебаниям параметров.

В непрерывных моделях осреднения по пространству нет и результатом решения в каждый момент времени служит гладкая кривая (или поле) распределения характеристик. Эти модели обычно сводятся к решению упрощенной системы дифференциальных уравнений термодинамики (двух уравнений движения, уравнения статики, уравнения неразрывности несжимаемой жидкости, уравнения переноса тепла и солей, уравнения состояния) и уравнений для изучаемых характеристик, аналогичных уравнениям баланса тепла и солей.

При реализации задач моделирования химических и биологических характеристик результаты решения системы уравнений термогидродинамики (рассчитанные поля скоростей течения, температуры, солёности) подставляют в уравнения переноса рассматриваемых показателей. Таким образом, представляется возможность исследовать их трансформацию, вызванную химическими, биологическими и биохимическими процессами, совместно с их массопереносом.

Выбор того или иного типа моделей зависит от задачи, стоящей перед исследователем. В этой связи подчас предпочтение отдается не сложным моделям, а примитивным, из-за их способности дать ответ на конкретно поставленные вопросы.

4.2. Задачи математического моделирования в морской экологии

Развитие и совершенствование методов океанологических исследований, включающих все области морской науки (физику, химию, биологию, геологию), а также смежных наук – гидробиологии, биофизики, биохимии, биогео- и гидрохимии определило тот факт, что в течение 30–60-х гг. XX века был накоплен огромный фактический материал, отражавший различные аспекты существования морских экосистем. Произошедшие в 40–60-х гг. изменения в характере водопотребления, рост объемов сбросов загрязненных сточных вод поставили экологов перед необходимостью исследования перспектив изменчивости водных экосистем с помощью математических моделей. Возникла необходимость систематизировать и обобщить полученные данные, формализовать имеющиеся представления в виде математических моделей с целью прогнозирования динамики свойств природных вод по основным химическим и биологическим показателям.

На первых этапах такой систематизации в 20–30-е гг. исследовались интегральные показатели трансформации веществ в природных водах и состояния водоемов с использованием моделей, воспроизводящих *режим растворенного кислорода в зависимости от содержания легкоразлагаемого органического вещества (ОВ) в единицах химического или биологического потребления кислорода (ХПК и БПК соответственно)*. Кроме того, уделялось внимание *трофическим межпопуляционным взаимоотношениям организмов (типа хищник–жертва)*.

В комплексе химико-биологических процессов, развивающихся в морской среде, особое внимание при моделировании уделяется механизмам, определяющим трансформацию и биогеохимическую цикличность элементов, входящих в состав живого вещества (C, N, P, S, Si). При этом на первых этапах моделирования внимание акцентировалось на *скоростях снижения концентраций химических веществ, утилизации и последовательных превращениях субстратов сообществом организмов, а также на скорости и механизме трансформации химических веществ*. В результате решались важные практические задачи.

1. Получали количественную информацию об изменениях во времени и пространстве химических и биологических характеристик морской экосистемы в зависимости от интенсивности воздействия на нее факторов среды обитания (температура, освещенность, прозрачность, водный режим, биогенная нагрузка).

2. Оценивалась способность морской экосистемы к самоочищению и разрабатывались рекомендации для создания наиболее эффективных условий для этого процесса.

3. Составлялся баланс веществ в природных водах с учетом обменных потоков на границах раздела вода–атмосфера, вода–дно,

а также поступления веществ с водами притоков и атмосферными осадками и потери веществ при выносе их водными массами из водоема.

4. Устанавливалась роль естественных и антропогенных процессов в круговороте биогенных веществ в морских экосистемах и на этом основании разрабатывались мероприятия по охране водных ресурсов, оценивался запас природных вод, потенциал их качества, определялись способы контроля загрязнения и механизмы очистки вод.

5. Оценивался запас биогенных элементов в природных водах и его пространственная и временная изменчивость под влиянием процессов их потребления планктонными организмами и регенерации при деструкции ОВ. Исследовались основы первичного продуцирования в водоемах и их биологической продуктивности на высших трофических уровнях.

6. Изучались поведение и распределение популяций, сообществ организмов в морской среде, воспроизводились особенности вертикальной неоднородности и горизонтальной мозаичности распределения гидробионтов, устанавливалась роль хищников в регуляции фотосинтетической активности фитопланктона.

7. Изучалась вертикальная структура сообществ микроорганизмов – биомасс разных групп фито- и зоопланктона, детрита, в тропической зоне океана, в пелагиали Японского моря, в пелагиали Перуанского апвеллинга.

8. Исследовались причины активизации (вспышек) развития биологических сообществ, инвазии новых для экосистем видов организмов (нововселенцев), цветения определенных групп водорослей (фото 4.1).

В настоящее время актуальными задачами математического моделирования биогеохимических процессов в морских экосистемах являются: изучение скоростей химико-биологических процессов, круговорота веществ в природных водах, условий формирования биологической продуктивности водоемов; оценка балансов соединений органогенных элементов в водной среде; а также комплексное изучение процессов химического обмена на границах раздела вода – атмосфера и вода – дно и химико-биологической трансформации веществ в водной среде и в донных осадках.

При изучении комплекса гидродинамических процессов, развивающихся в морской среде, основное внимание при математическом моделировании состояния морских экосистем уделяется задачам горизонтального и вертикального переноса загрязняющих веществ, установлению условий формирования и распада скоплений морских организмов (фито- и зоопланктона, пелагических и донных промысловых объектов), перераспределения жизни по вертикали.

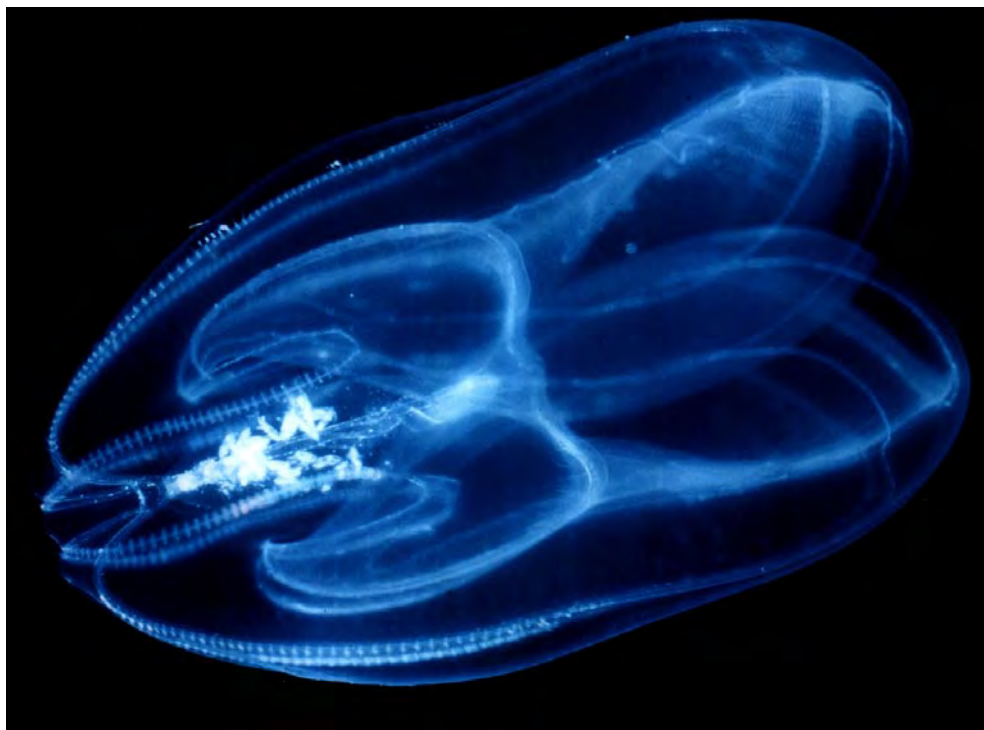


Фото 4.1. *Одной из важнейших сфер «интересов» математического моделирования морских экосистем сегодня оказывается катастрофическое развитие в южных морях России популяций желтого новоселенца гребневика *Mnemiopsis Ledy*.*

4.3. Моделирование биохимических процессов в морских экосистемах

Согласно существующим представлениям о характере процесса обобщения данных экологических исследований, на первом его этапе преобладает математическая обработка информации, на втором – моделирование, а на третьем – создание математической теории. Уровень математизации морской экологической науки к 80-м гг. XX века соответствовал первому этапу, хотя первые робкие шаги в рамках второго этапа были сделаны еще в начале XX века – модель кислородного режима рек (Стритера – Фелпса) и взаимоотношений типа хищник – жертва (Волтерра – Лотка), а в мире имелось около 150 математических моделей водоемов и водотоков различной сложности.

Более сотни из этого количества были разработаны для озер и водохранилищ, из них треть создали отечественные авторы. Моделировались экосистемы Великих американских озер, а также Братского, Иваньковского, Рыбинского, Можайского, Зейского, Днепровских и других водохранилищ. При этом, кроме задач евтрофирования водоемов, оценок потоков энергии и продуктивности, решались вопросы влияния периодического затопления суши на экосистему, массового «цветения» водохранилищ. Большинство из этих моделей являются точечными корреляционно-регрессионными и точечными, или двухрезервуарными, моделями первичного продуцирования и бюджета фосфора как лимитанта и фактора евтрофирования водных систем. Имитационные модели занимали только 10 % в общем числе выполненных математических разработок и численных экспериментов.

С помощью значительного количества разработанных моделей к 80-му г. исследовались экосистемы континентальных источников, рек, ручьев, а также временных водоемов и прудов как самых простых объектов для моделирования, и имелись только единичные модели, в которых пытались описать состояние экосистем морских водоемов или отдельных их участков.

К началу XXI века в мире уже было разработано достаточно много имитационных моделей, способных аналитически и численно исследовать происходящие в водных экосистемах изменения важнейших химических и биологических характеристик. Их обстоятельный обзор представлен в многочисленных литературных источниках.

Тем не менее большинство моделей, касающихся вопросов трансформации веществ в морской среде под влиянием биохимических процессов, являются точечными, или резервуарными. В пространственных моделях этим вопросам уделяется меньше внимания и акцент делается больше на анализе пространственно-временной изменчивости гидрохимических и биологических компонентов водных экосистем.

4.3.1. Формализация биохимических процессов в математических моделях

Объектом исследования в биогеохимии являются химические биогенные (органогенные) элементы и их минеральные соединения. К главным из них относятся те, из которых в основном состоят живые организмы – углерод, кислород, фосфор, азот, сера, кремний и некоторые другие. Кроме того, к микробиогенным элементам, важнейшие из которых, например, железо, марганец, относятся практически все элементы, обнаруженные в океане. В. И. Вернадский определял органогенные элементы как циклические, подвергающиеся обратимым процессам. При этом их циклы обратимы лишь в главной части атомов, а часть атомов выходит из круговорота.

Пространственную и временную изменчивость биогенных элементов, участвующих в обратимом круговороте, в океане определяют две группы процессов. Первая – химико-биологические окислительно-восстановительные и абсорбционно-десорбционные, изменяющие концентрации свойств в конкретном объеме воды. Ко второй группе относятся гидрофизические процессы адвекции и турбулентности, ответственные за перенос химических элементов, условно рассматривающихся как пассивная примесь. Для взвешенных форм биогенных элементов большое значение имеют также процессы пассивного их оседания (седиментации). Все эти процессы определяют динамику химических веществ в морской экосистеме. Кроме того, большое значение при математическом моделировании в экологии принадлежит обменным процессам на границе воды с воздухом и грунтом.

Таблица 4.1.

Процессы, влияющие на распределение и изменчивость химических элементов в океане [Монин, 1982]

Процесс	Масштаб (сек.)	Время действия	Источник
Газообмен океан–атмосфера	10^1	Десятки сек.	Emerson, 1995
Гидролиз газов и процессы в карбонатной системе	10^1	Десятки сек.	Emerson, 1995
Физиологические ритмы морских организмов	10^{5-6}	Часы–месяц	Рудяков, 1986
Адвективный и турбулентный перенос (поверхностные воды)	10^{6-7}	Сутки–год	Монин и др., 1974
Химико-биологические	10^{6-7}	Сутки–год	Монин и др., 1974
Антропогенный CO_2	10^9	30–40 лет	Gruber et al., 1996
Окисление стойкого водного гумуса (B0B)	10^{11}	2000 лет	Скопинцев и др., 1979
Адвективный и турбулентный перенос (глубинные воды)	10^{11}	1000 лет	Монин и др., 1974
Седиментация	$> 10^{12}$	> 10000 лет	Монин и др., 1974

В отличие от моделей распределения гидрофизических показателей состояния морских экосистем, основанных на решении системы стандартных дифференциальных уравнений, в биохимических моделях такой системы уравнений нет. Существуют лишь утвердившиеся способы параметризации моделируемых процессов. При этом чрезвычайно важными оказываются соотношения пространственных и временных масштабов гидрофизических процессов, в рамках которых они способны повлиять на формирование пространственного распределения гидрохимических и биологических показателей. По определению А. С. Мониной, пространственным неоднородностям присущи типичные времена производящих их процессов (табл. 4.1):

- *мелкомасштабным* (доли мм – десятки метров) – от 10^{-3} сек. до десятков часов;
- *мезомасштабным* (сотни метров – километры) – от часов до суток;
- *синоптическим* (десятки и первые сотни километров) – от суток до месяцев;
- *глобальным* (тысячи и десятки тысяч километров) – от лет до сотен лет.

Очевидно, что на любом масштабе времени на формирование полей гидрохимических показателей активно влияют несколько процессов, что необходимо учитывать при разработке математической модели. При этом в верхнем слое океана, где значение химико-биологических процессов максимально, каждому процессу соответствуют определенное характерное время и характерные величины концентраций компонентов. С увеличением глубины такая закономерность нарушается. Содержание живых организмов и ОВ в этом случае снижается экспоненциально, а концентрации биогенных веществ (например, фосфатов) растут. При этом характерные масштабы изменения концентраций растворенных неорганических форм, биогенных элементов, а также их взвешенных, органических форм, в том числе в составе живых организмов, различаются более чем на четыре порядка. Таким образом, способ параметризации химико-биологических процессов должен быть связан с масштабами изменчивости концентраций форм химических элементов в выбранном объекте моделирования и пространственно-временным масштабом решаемой задачи.

Под химико-биологическими процессами подразумевается совокупность процессов синтеза ОВ из неорганических соединений, переноса его по трофическим цепям, выделений в виде органических и неорганических форм из живых и мертвых организмов, автолиза взвеси и минерализации ОВ. Процесс синтеза и распада ОВ протекает в рамках классического стехиометрического уравнения Редфилда с учетом обмена веществом между различными организмами в пределах экосистемы.

При моделировании *потребления биогенных элементов в про-*

цессе синтеза органического вещества (фотосинтезе) принимаются во внимание следующие положения:

- удельная скорость фотосинтеза прямо пропорционально связана с ростом биомассы фитопланктона и скоростью потребления биогенных элементов;
- средний размер клеток фитопланктона и их химический состав одинаковы и постоянны;
- автотрофный рост прекращается при нулевых значениях освещенности и концентрации биогенных элементов.

При этом учитывается сложная, неоднозначная зависимость интенсивности фотосинтеза от интенсивности и продолжительности освещенности, концентрации биогенных элементов в среде и в клетке, температуры и солености воды, размера и вида растения.

Большинство моделей экосистем при описании фотосинтеза опирается на концепцию лимитирующего фактора, управляющего скоростью этого процесса. В 1840 г. Либихом был сформулирован закон, в соответствии с которым скорость фотосинтеза лимитируется тем химическим элементом, отношение концентрации которого в среде к концентрации его в морских организмах минимально. В 1905 г. Блэкман расширил этот закон концепцией лимитирующего фактора, а в 1911 г. Шелфорд сформулировал более общий принцип толерантности, заключающийся в том, что выносливость организма (вида) определяется как максимумом, так и минимумом диапазона изменений экологического фактора. При моделировании морских экосистем в качестве лимитанта обычно используют один из биогенных элементов – азот, фосфор, реже кремний. Но в отличие от закона Либиха в этих моделях обычно фигурирует только концентрация лимитанта в воде, но не в организмах.

При моделировании *выделения соединений биогенных элементов из автотрофных организмов* учитывается поступление этих веществ в морскую среду в процессе дыхания (неорганические соединения), эксудации (потеря органического вещества в процессе жизнедеятельности морских водорослей, которая может достигать 40 % от дневной чистой продукции) и при отмирании.

При моделировании *трансформации биогенных соединений гетеротрофными организмами* учитывается их потребление автотрофами (фитопланктоном) и образование мертвого органического вещества (детрита) зоопланктоном, выделение этих соединений при дыхании, метаболизме и отмирании зоопланктона в виде растворенных неорганических и взвешенных органических форм, а также при выедании одних гетеротрофных организмов другими.

4.3.2. Точечные модели

В 1960-х гг. К. Виртки моделировал вертикальное распределение гидрохимических показателей в морских экосистемах. В его одномерной модели исследовалось формирование слоя минимума кислорода и максимума фосфатов в промежуточных водах океа-

на, при этом учитывались БПК и вертикальный турбулентный обмен, что позволило получить хорошее совпадение с наблюдаемой в океане картиной и провести численные эксперименты изменения изучаемых показателей под влиянием параметров модели.

В это же время В. Ватт и Ф. Хейс на основании анализа проб отобранных в районе Галифакса (Канада) предложили модель, учитывавшую три формы фосфора: растворенный неорганический (DIP), растворенный органический (DOP) и взвешенный (PP). Подобранные коэффициенты удовлетворительно отражали динамику процесса фосфатификации в море уже в условиях экспедиции.

В 1970-х гг. эта модель была уточнена путем подразделения взвешенного фосфора на три составляющие (бактерии, зоопланктон и детрит). Для описания трансформации Р с учетом бактерий и зоопланктона использовались уравнения реакции первого порядка, уравнения в форме схемы Михаэлиса – Ментен и ряд других схем последовательной трансформации химических форм фосфора.

В точечной нестационарной модели Дж. Стила отражены общие черты сезонной динамики концентраций фосфатов и фитопланктона в фотическом слое Северного моря. В ней рассматриваются количество фосфатов и биомассы фитопланктона. Для описания их динамики в открытой системе были учтены сезонная изменчивость освещенности, перемешивания, оседания, концентрация зоопланктона, потребляющего в составе пищи фитопланктон. Аналогичная задача для Балтики решалась в более подробной модели, учитывавшей сезонную трансформацию соединений азота. В ней наряду с нитратами, нитритами, аммиаком и растворенным органическим азотом были представлены также фито- и зоопланктон.

Точечная имитационная модель Г. Хорнберга и Р. Спира посвящена исследованию влияния евтрофирования лимана на рост придонных водорослей. В ней рассматривается трансформация форм фосфора в воде лимана, в осадках, фитопланктоне и в придонных водорослях. Применяются зависимости Михаэлиса–Ментен, уравнения первого порядка, учитываются влияние света, температуры, а также поступление Р из внешних источников (с речными и дождевыми водами). Рассчитывается сезонная изменчивость форм Р с оценкой вклада различных процессов.

В 1990 г. появилась модель Фэшема, Даклоу и МакКелви, описывавшая сезонную динамику соединений азота в верхнем квазиоднородном слое океана. В ней рассматривалась трансформация нитратов, аммония, лабильного растворенного органического азота и детрита при участии фито-, зоопланктона и бактерий. Эта модель стала эталоном для моделирования как крупномасштабных черт глобальных биогеохимических циклов, так и для других, более быстрых процессов в водной среде.

Сезонная изменчивость вертикальной гидрохимической структуры на примере конкретных данных наблюдений исследовалась с помощью модели Фэшема. Кроме того, О. П. Савчук с соавторами изучал на своей модели вертикальное распределение форм

фосфора (фосфаты, детрит), азота (нитраты, аммоний, детрит), кислорода и биологических характеристик (фито- и зоопланктон) с оценкой роли различных факторов в формировании вертикальной гидрохимической структуры глубинной части Балтийского моря.

4.3.3. Боксовые модели

В серии моделей этого типа, предложенной шведскими учеными, на основании исследования циркуляции Мирового океана по дефициту биогенного элемента в боксе находятся составляющие массопереноса. Боксовая модель Х. Постмы рассматривает баланс фосфора в Мировом океане, разбитом на девять однородных боксов, с учетом процессов потребления, регенерации, оседания и обмена. Дж. Сарmento с соавторами с помощью такой же модели исследовал особенности влияния атлантического субтропического круговорота на перенос радиоактивных трассеров, а также нитратов и кислорода, что позволило ему оценить характеристики новой продукции по нитратам и БПК.

С помощью боксовой модели советскими и финскими учеными успешно исследовались экосистемы озера Балатон в Венгрии, динамика форм фосфора, условий функционирования ряда водных экосистем Финляндии. Одна из версий этой модели, включающая формы азота и растворенного органического вещества, была применена А. В. Леоновым с коллегами для исследования экосистемы Ладожского озера. Более поздняя версия модели позволяет рассчитывать трансформацию основных соединений органогенных элементов (углерод, азот, фосфор, кислород). Современный вариант модели учитывает характеристики загрязнения (нефтепродукты, пестициды, тяжелые металлы, фенолы), продукцию фитопланктона и концентрации веществ в донных осадках. Отдельные комплексные разработки использовались при исследовании экосистем Охотского и Каспийского морей. При моделировании Охотского моря исследовались циклы азота, фосфора и кремния параллельно. Всего рассматривалось десять блоков, из которых шесть включали живые организмы. Аналогичные расчеты были проведены для экосистемы залива Анива на шельфе о. Сахалин.

Следует отметить, что огромный вклад в изучение биогидрохимии природных вод, в развитие методов математического моделирования совместной биологической и химической трансформации вещества в морских экосистемах внес Т. А. Айзатулин. Он впервые в отечественной практике обратил внимание на формализацию циклов и механизмов превращений соединений биогенных элементов при анализе закономерностей динамики биомасс гидробионтов и концентраций биогенных веществ в море. Им же был предложен химико-кинетический аппарат, описывающий регенерацию минеральных компонентов биогенных веществ и процессов трансформации органических и неорганических метаболитов как важного звена целостной химико-экологической системы.

Построенные на основе такого химико-кинетического подхода модели сначала предназначались для изучения динамики концентраций растворенного кислорода и окисления ОВ, а также совместных циклов серы и кислорода, азота и кислорода, фосфора и кислорода, углерода, фосфора и кислорода, азота, фосфора и кислорода в замкнутых системах. В более поздних разработках моделировались совместные циклы биогенных элементов в разных их комбинациях в морской среде с использованием от нескольких штук до нескольких десятков уравнений, описывающих динамику биологического сообщества, концентраций различных форм биогенных элементов и биомасс организмов-трансформаторов вещества.

4.3.4. Непрерывные модели

В середине XX века крупномасштабное меридиональное распределение фосфатов в Атлантическом океане исследовалось на непрерывной модели. При этом течения рассчитывались динамическим методом по пятиградусной сетке, в каждой точке разность потребления и выделения фосфатов компенсировалась их переносом за счет физических процессов. Это была первая попытка исследовать распределение гидрохимических характеристик в океане с помощью математического моделирования.

Распределение кислорода в меридиональном сечении Атлантического океана исследовалось с помощью непрерывной двумерной модели, в которой задавалось распределение кислорода на поверхности и его биологическое потребление в толще вод. При этом принятая циркуляционная схема отражала два круговорота в Южном полушарии и один – в Северном.

Для анализа кислородного режима в водах Мирового океана использовалась интегральная двухмерная схема циркуляции Мирового океана, рассчитанная по пятиградусной сетке. При этом учитывались поток кислорода через поверхность океана, пространственная изменчивость продукции и потребления кислорода. В этом случае для построения гидрохимической модели была использована «готовая» схема циркуляции вод.

Такой подход в последнее десятилетие стал доминирующим. В моделях типа «coupled models» гидрофизическое представление конкретного объекта соединяется с моделью биогеохимической трансформации органогенных элементов. Для Черного моря используется схема биогеохимических источников фитопланктон – зоопланктон – РОВ – нитраты – аммоний, а элементы глобального переноса органического вещества исследуются с помощью трехмерной модели циркуляции и упрощенной модели биогеохимической трансформации фосфора.

В 1970-х гг. ростовские исследователи разработали первую непрерывную комплексную модель экосистемы Азовского моря. В комплексной имитационной модели Азовского моря рассматрива-

лись вопросы влияния на водные ресурсы бассейна хозяйственной деятельности человека. Наряду с биологическими компонентами различных трофических уровней в модели рассматриваются концентрации биогенных элементов как показатели уровня евтрофирования морской экосистемы. Описывается круговорот соединений фосфора, азота и кремния с учетом процессов их переноса, распада, потребления, абразии берегов и других факторов. Современное развитие Ростовской школы моделирования отражено в монографии «Среда, биота и моделирование экологических процессов в Азовском море» (под ред. Г. Г. Матишова. – 2001. – Аппатиты: изд-во КНЦ РАН. – 413 с.).

4.3.5. Гидроэкологическая модель трансформации соединений органогенных элементов

После анализа существующего опыта изучения природы морских водоемов методами математики для решения задач морской экологической географии была выбрана имитационная боксовая гидроэкологическая модель трансформации соединений органогенных элементов в морской среде, разработанная в конце XX века А. В. Леоновым. Современный вариант модели учитывает характеристики загрязнения (нефтепродукты, пестициды, тяжелые металлы, фенолы), продукцию фитопланктона и концентрации веществ в донных осадках. В последнее десятилетие модель успешно используется для исследования состояния экосистем дальневосточных морей.

В выбранной модели для изучения режима трансформации НП в морской экосистеме за основу взяты *не численность или биомасса нефтеокисляющих бактерий, а их биохимическая активность* – способность осуществлять цикл процессов, включающий потребление пищевых субстратов, выделение продуктов жизнедеятельности, образование детрита. Модель описывает взаимосвязанные биогеохимические циклы таких элементов, как N и P, а также включает описание скоростей трансформации Si, растворенного органического C и кислорода в двухслойной водной экосистеме. Таким образом, рассчитывается динамика концентраций DOC, O₂, N-, P- и Si-содержащих веществ при их биотрансформации и развитии процессов обмена веществ через границы раздела вода – воздух и вода – дно.

Модель учитывает следующие соединения P, N и Si: *детритный P, растворенные неорганический и органический P, органический, аммонийный, нитритный и нитратный N, азот мочевины и свободный азот, неорганический, органический и детритный Si.*

Воспроизводимая моделью биотрансформация соединений органогенных элементов осуществляется сообществом микроорганизмов: *гетеротрофные бактерии потребляют органические соединения и в процессе метаболизма образуют пул минеральных веществ; фитопланктон утилизирует минеральные веще-*

ства и формирует запас органических веществ в водной среде; зоопланктонные организмы регулируют динамику организмов сообщества и своей активностью влияют на развитие продукционно-деструкционных процессов.

Фактически модель воспроизводит переходные процессы и описывает реакцию водной экосистемы на изменения условий среды обитания или на изменение хотя бы одного из учитываемых в модели факторов (водный режим, температура, освещенность водной среды, биогенная нагрузка). Она содержит 226 уравнений, описывающих:

- изменение концентраций исследуемых компонентов;
- удельные скорости потребления органогенных веществ гетеротрофными бактериями, фито- и зоопланктоном;
- функции и коэффициенты для коррекции констант скоростей потребления субстратов гидробионтами на температуру и освещенность;
- удельные скорости метаболических выделений организмов и их выделительные активности;
- удельные скорости отмирания организмов;
- суммарные скорости изменения биомасс микроорганизмов за счет взаимодействий химических и биологических компонентов рассматриваемого сообщества;
- суммарные скорости изменения концентраций биогенных веществ в водной среде и седиментах;
- скорости поступления веществ из внешних источников (с атмосферными осадками и из рассредоточенных источников).

При расчете скоростей изменения концентраций органогенных веществ за счет горизонтального и вертикального переноса учитываются:

- поступление указанных веществ в рассматриваемые акватории моря извне с водами притоков;
- пополнение запаса веществ за счет вертикального обмена с нижележащим слоем;
- перенос веществ из соседних акваторий в пределах морской экосистемы и их потери при выносе водным потоком через внешние границы морской экосистемы.

Блок биохимической трансформации НП нефтеокисляющими бактериями в модели включает десять уравнений, описывающих:

- √ изменение концентраций НП и биомассы нефтеокисляющих бактерий;
- √ суммарное и раздельное потребление субстратов (НП и DOC) нефтеокисляющими бактериями;
- √ функцию активности нефтеокисляющих бактерий в зависимости от температуры;
- √ удельные скорости выделения продуктов метаболизма и отмирания биомассы нефтеокисляющих бактерий.

Таким образом, модель описывает внутригодовую динамику химико-биологических показателей состояния водной среды,

мгновенные скорости процессов, ответственных за изменение концентраций веществ, внутренние и внешние потоки веществ в разных акваториях исследуемой экосистемы, а также время оборота всех рассматриваемых в модели химических и биологических компонентов.

4.4. Гидродинамические модели морской среды

Временные масштабы биохимической трансформации нефтепродуктов в морской среде составляют месяцы, годы, а в некоторых случаях – десятилетия. В то же время, оказавшись в воде, нефтяной разлив подвергается более короткопериодным трансформациям (часы, сутки), вызванным синоптической изменчивостью гидрометеорологических и гидродинамических условий в водоеме и над его акваторией.

В конце XX века, благодаря применению современных измерительных приборов и адекватной пространственно-временной измерительной стратегии, были получены качественно новые данные о структуре, синоптической и мезомасштабной изменчивости гидрофизических полей в Мировом океане. Реальное динамическое состояние морских акваторий определяется такими процессами, как синоптические вихри, фронты, меандры течений, шельфовые ветровые течения. При этом прогресс, достигнутый современными атмосферными моделями в прогнозе погоды, позволяет использовать модельные параметры приводного слоя атмосферы для моделей динамики моря в режиме реального времени (в отличие от практиковавшегося в 60–80-е гг. XX века задания климатических атмосферных полей). Таким образом, в настоящее время сложились предпосылки для создания совместных моделей динамики океана и атмосферы и их взаимодействия, способных воспроизводить состояние гидродинамики морской среды, а следовательно, исследовать динамику ее нефтяного и химического загрязнения в синоптических масштабах времени.

На протяжении последних тридцати лет различные аспекты проблемы аварийных разливов нефти в море являются предметом обсуждения на ежегодных международных конференциях «Oil Spill Conference», проводимых в США. Первое десятилетие после нашумевшей катастрофы танкера «Torrey Canyon» большое внимание уделялось исследованию физико-химической трансформации нефти. Сегодня не вызывает сомнения факт, что, исследуя поведение нефти в море, прежде всего необходимо принимать во внимание следующие процессы:

- перенос нефти по поверхности моря под совокупным действием ветра, волн и течений;
- растекание нефти по поверхности моря;
- турбулентное рассеяние нефти на поверхности моря и в водной толще;

- испарение нефти в естественных условиях;
- проникновение нефти в водную толщу с поверхности раздела вода – воздух в виде капель;
- образование эмульсии типа «вода в нефти», «шоколадного мусса» (фото 4.2).



Фото 4.2. Наряду с процессами переноса, растекания, растворения и испарения нефти гидродинамические модели описывают и ее эмульгирование – образование «шоколадного мусса».

Таким образом, адекватность физико-математических моделей распространения нефти после аварийного разлива зависит от уровня наших знаний характера распределения гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров в конкретном месте и в конкретное время. Степень изученности вышеупомянутых процессов на сегодняшний день различна. Для некоторых уже сформулированы математические модели, соответствующие современному уровню физических представлений, для других существуют лишь эмпирические параметризации или качественные представления.

Тем не менее во всем мире создаются и используются для разнообразных расчетов и прогнозов так называемые модели нефтяных разливов «Oil Spill Models». Наиболее известные на сегодняшний день модели: американская «**OILMAP-WOSM**» (**Worldwide Oil Spill Model**), «**ADIOS**» (**Automated Data Inquiry for Oil Spills**) и «**GNOME**» (**General NOAA Oil Modelling Environment**); американско-норвежская

«COZOIL» (Coastal Zone Oil Spill Model); английская **«OSIS» (Oil Spill Information System)** и отечественная **«SPILLMOD» (Oil Spill Modeling)**, разработанная коллективом авторов из Государственного океанографического института под руководством С. Н. Овсиенко.

Модель «OILMAP-WOSM» (Worldwide Oil Spill Model) создавалась по заказу американских нефтяных компаний и ими же сегодня используется в тех районах, где у компаний есть бизнес. При расчетах в параметризованном виде учитываются процессы растекания, испарения и диспергирования нефти. Модель «COZOIL» «выросла» из того же «инкубатора», что и «OILMAP», развилась совместными усилиями американских и норвежских специалистов и сегодня наиболее сложная в своей архитектуре, так как предполагает использование блока расчетов прибрежной волновой динамики, знание морфологических особенностей береговой зоны и прибрежной полосы.

Модель «OSIS» принципиально отличается от двух вышеупомянутых способом математического описания распространения нефти, так как нефтяной разлив в этой модели представляется как ансамбль нефтяных капелек разного размера, которые в процессе моделирования попадают с поверхности в воду и затем всплывают под действием сил плавучести, одновременно участвуя в диффузионном рассеянии и переносе в верхнем перемешанном слое моря.

4.4.1. Российская гидродинамическая модель нефтяного разлива «SPILLMOD»

Российская модель «SPILLMOD» к настоящему времени имеет достаточно широкую географию применения как в России, так и в международных проектах. Особенностью модели является вычислительная технология, позволяющая рассчитывать изменение конфигурации нефтяного пятна и его свойств в области с произвольной геометрией контактных границ. В отличие от других известных моделей процессы растекания и переноса нефти в «SPILLMOD» рассчитываются не параметрически, а «гидродинамически», что позволяет воспроизводить динамику нефтяного пятна наиболее достоверно. Вычислительные алгоритмы позволяют учитывать практически все известные процессы трансформации нефтяного разлива, а также включить в модель действия средств механической уборки нефти с поверхности моря (суда-нефтесборщики), применение химических диспергентов, локализации нефти с помощью боновых заграждений, сжигания нефти. Не случайно, модель с 1998 г. является основой компьютерных тренажеров Морской академии береговой охраны США, разработанных английской компанией «TRANSAS MARINE».

Для Каспийского моря, например, программный комплекс «SPILLMOD» включает модели: динамики течений, динамики морского льда, совместную модель динамики течений и льда, модели ветрового волнения и динамики нефтяного разлива с процессами его физико-химической трансформации (рис. 4.2).

Возможные направления применения моделей разливов нефти:

- прогноз уже случившейся аварии;
- ретроспективный прогноз (расчет) для анализа последствий аварии;
- расчет гипотетических аварий для оценки возможных последствий;
- обучение специалистов на компьютерных тренажерах-имитаторах аварийной ситуации;
- разработка и выбор эффективной стратегии применения технических средств локализации и ликвидации разлива нефти.



Рис. 4.2. Схема модельного комплекса «SPILLMOD» для условий Каспийского моря [Овсиенко и др., 2005].

Имитация аварийных ситуаций. В большинстве случаев аварии в море происходят в сложных гидрометеорологических условиях, и время для принятия решения конкретных мер реагирования ограничено. По этой причине заранее просчитанные сценарии возможного развития аварийной ситуации могут оказать реальную пользу. Моделирование распространения нефти обеспечивает возможность до возникновения аварийной ситуации оценить вероятные масштабы поражения морской среды. По результатам компьютерной имитации специалисты, занимающиеся разработкой планов ликвидации аварийных разливов нефти (ЛАРН), могут сделать вывод о том, как нужно организовать силы и средства для предотвращения или минимизации последствий аварийной ситуации, а модели применения технических средств борьбы с разливом позволяют оценить различные стратегии локализации нефти в море и минимизации последствий аварии. Используя, например,

данные географо-экологической модели Керченского пролива в качестве исходной информации, в 2006 г. мы реализовали на модели «SPILLMOD» 16 прогностических численных расчетов (сценариев) трансформации нефтяного пятна под влиянием физико-динамических процессов (см. рис. 3.18 гл. 3). Аналогичные расчеты были проведены и для северо-восточного шельфа о. Сахалин.

На рис. 4.3 показан еще один пример модельной имитации аварийной ситуации в море – расчет на модели «SPILLMOD» конфигурации пятна нефти, формирующегося при различных ветровых ситуациях через два часа после разлива 1500 тонн сырой нефти при перегрузке в районе терминала в порту Туапсе.

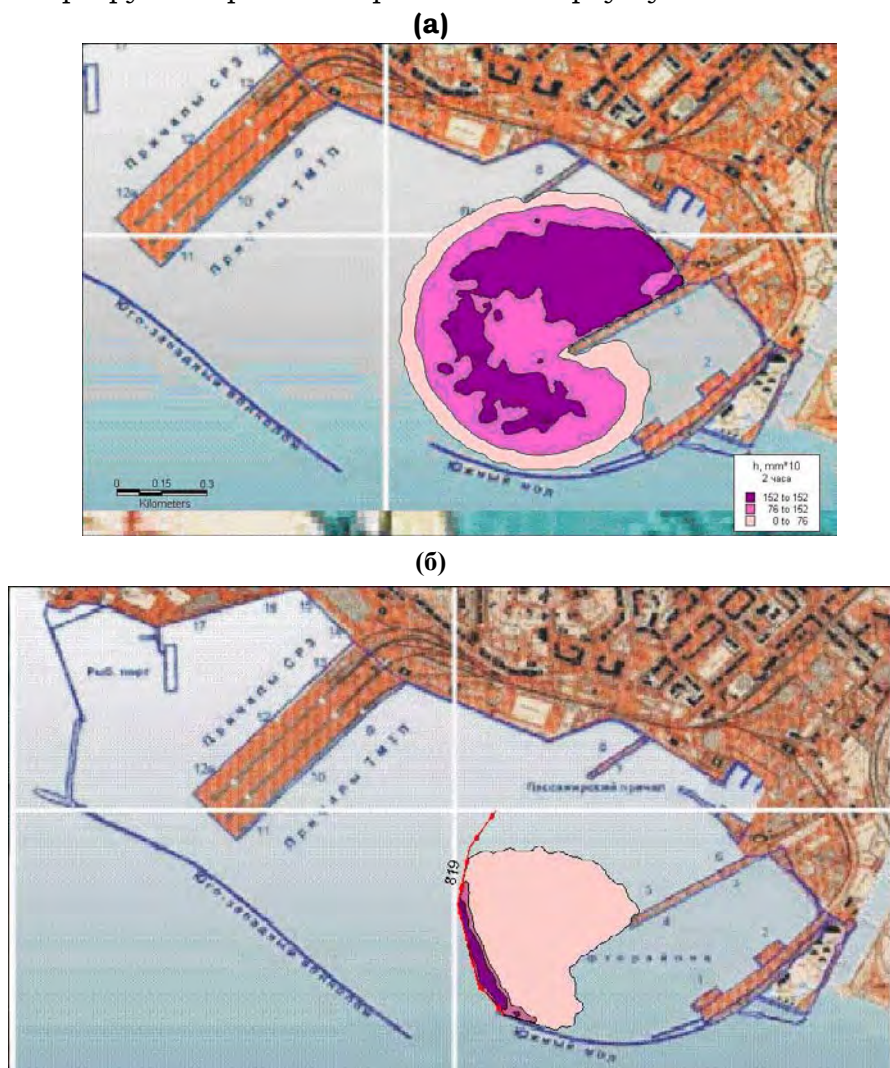


Рис. 4.3. Сценарий трансформации нефтяного пятна в порту Туапсе через два часа после разлива 1500 т нефти [Овсиенко и др., 2005]. (Ветер: а – штиль; б – северо-восток 6 м/с.)

Определение зон риска и вероятности поражения нефтяным разливом объекта на акватории или в прибрежной зоне моря. Важной статистической характеристикой области возможного распространения нефти является зона риска поражения объектов на акватории или в береговой зоне за определенные промежутки времени. На рис. 4.4 показаны вложенные области, границ которых нефтяной разлив может достичь, если не предпринято мер по его локализации и ликвидации. Методика построения зон риска заключается в следующем. Область акватории вокруг источника разбивается на подобласти или ячейки прямоугольной сетки со сторонами, достаточными для того, чтобы все траектории движения нефтяных slickов попадали в выбранную зону. После этого для каждого элемента сетки подсчитывается минимальное время, за которое нефтяной разлив может попасть в рассматриваемую ячейку. По полученному сеточному массиву данных строятся контуры областей или зон риска, внутри которых нефтяной разлив может оказаться в пределах выбранных сроков, или, другими словами, выход нефтяного загрязнения в указанное время за пределы соответствующих зон маловероятен.

Вероятность поражения того или иного объекта в пределах определенной зоны может меняться в широких пределах и зависит от времени, прошедшего после аварийного разлива нефти, взаимного расположения источника сброса и уязвимого объекта, линейных и площадных характеристик объекта защиты, объема и режима сброса нефти. Как правило, рассчитывается условная вероятность поражения объектов, то есть *при условии*, что разлив произошел. Вероятность осуществления события, связанного с разливом нефти различного объема, проводится при оценке промышленного риска.

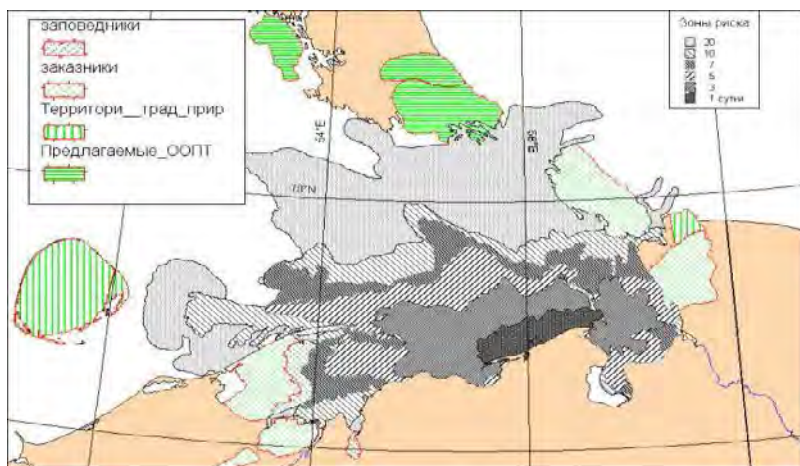
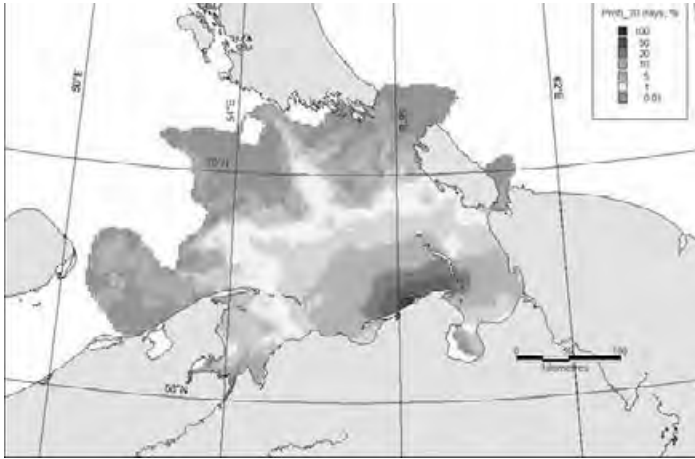


Рис. 4.4. Зоны риска распространения нефти при аварийном сбросе нефти в районе причала Варандей (Печорское море) [Овсиенко и др., 2005].

(a)



(б)

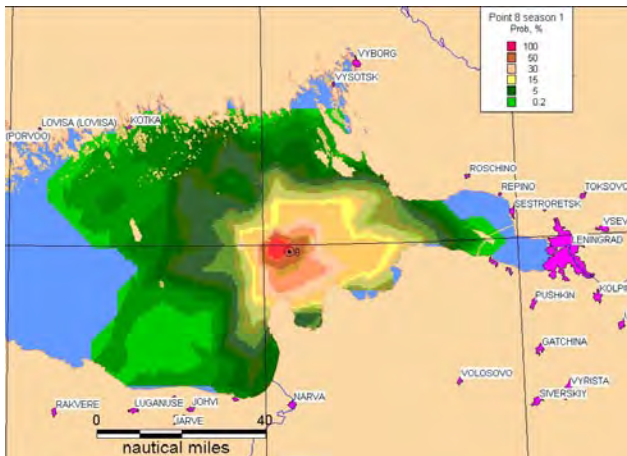


Рис. 4.5. Вероятность поражения нефтяным разливом участков акватории в районе терминала Варандей в Печорском море (а) и в зоне гипотетического разлива в Балтийском море (б) [Овсиенко и др., 2005].

На рис. 4.5. показано распределение вероятности поражения десятикилометровых «квадратов» акватории при залповом сбросе нефти в районе терминала Варандей в Печорском море и в условной точке 8 на Балтике.

Прогноз развития аварийных ситуаций после нефтяного разлива. Существенным элементом системы предотвращения негативных последствий конкретных (уже случившихся) аварийных разливов нефти в море является *оперативный прогноз* развития ситуации. В результате *прогноза* траектории движения нефтяного slicka и изменения характеристик нефти или нефтепродуктов возможно организовать эффективную кампанию по борьбе с разливом. Для этих целей также можно использовать программный

комплекс «SPILLMOD», созданный на базе системы математических моделей, описывающих основные гидрометеорологические процессы, определяющие поведение нефти в морской среде.

Первая версия модели «SPILLMOD», разработанная в 1990 г., была использована в оперативном режиме для прогноза развития катастрофического разлива сырой нефти в Персидском заливе во время военных действий в январе-феврале 1991 г., когда в течение четырех дней с нескольких точек побережья Кувейта в северо-западную часть Персидского залива было сброшено около шести млн. баррелей нефти. Спустя три месяца после проведения расчетов, их результаты были сопоставлены с данными спутниковых наблюдений в районе военных действий. Несмотря на ограниченный набор исходных данных, взятых для расчетов, результаты сравнения оказались достаточно обнадеживающими (рис. 4.6).

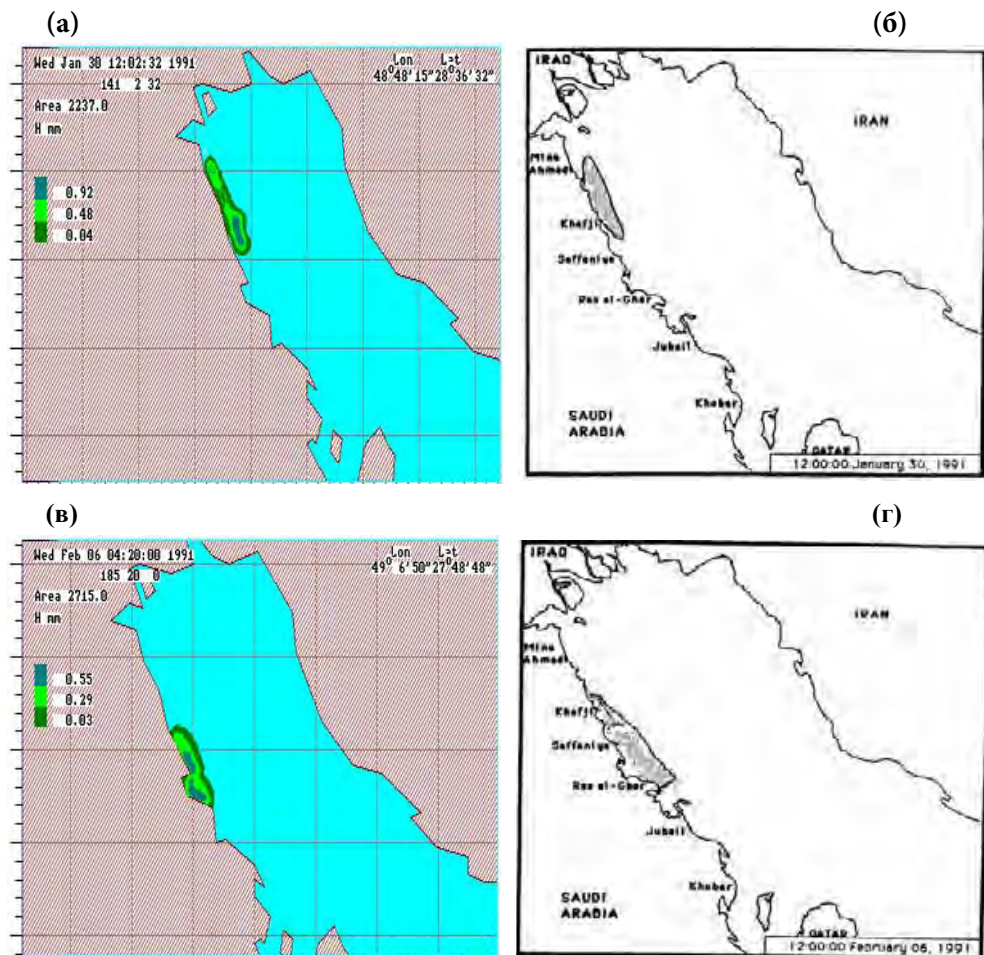


Рис. 4.6. Модельные расчеты динамики нефтяного пятна в Персидском заливе (а, в) и его фактическое положение по данным спутниковых наблюдений (б, г) [Овсиенко и др., 2005].

4.5. Выводы

С помощью методов математического моделирования на основе системного взаимосвязанного описания химических, биологических и физических процессов (географо-экологических информационных моделей) изучаются проблемы долгосрочного изменения химического состава природных вод в пространстве и во времени. Вместе с тем на базе современной информации, численных методов и вычислительных средств созданы математические модели, способные описать основные динамические процессы, протекающие в океане в синоптическом пространственно-временном масштабе.

В перспективе этот аппарат можно применять для контроля за состоянием водоемов, отслеживания роли антропогенных факторов в формировании качества водных ресурсов, свойств природных вод отдельных водоемов и водотоков, а также бассейнов и акваторий морских экосистем. В частности, исследования представляются весьма актуальными при решении экологических проблем, планировании природоохранных мероприятий, рационализации использования биологических и минеральных ресурсов Каспийского, Баренцева, Черного, Белого, Охотского и других морей России с учетом предстоящего освоения их шельфовых месторождений нефти и газа, строительства терминалов и портов для переработки и транспортировки нефтяных углеводородов.

По известным экономическим причинам комплексные наблюдения за состоянием экосистем этих водоемов сегодня практически не проводятся или носят эпизодический характер. В этих обстоятельствах особую актуальность приобретают методы математического моделирования, с помощью которых на основании имеющейся скудной и нерегулярной информации представляется возможность:

- оценить объемы поступления биогенных веществ в водоем с речным стоком, атмосферными осадками, в результате обмена на границе раздела вода–дно;
- оценить реакцию экосистемы на изменение мощности этих источников по изменению потоков биогенных веществ за счет развития процессов биотрансформации (потребление питательных веществ, выделение продуктов метаболизма, отмирание гидробионтов, интенсивность трофодинамических взаимодействий), а также при переносе компонентов водных масс через границы между соседними акваториями;
- оценить эффекты эвтрофирования по возрастанию биомассы гидробионтов, интенсивности и продолжительности периодов цветения планктона, изменению условий биогенного лимитирования процессов биопroduкции (Р или N);
- оценить интенсивность вертикального переноса и обмена биогенными элементами и органическим веществом между верхним и нижним слоями моря, а также условия создания дефицита кислорода в проиодонных водах;

- идентифицировать и количественно оценить роль основных биологических компонентов, участвующих в продукционном цикле и способствующих перераспределению форм биогенных элементов в столбе воды, а также по внутригодовому их поступлению и последующей биотрансформации в экосистеме моря;
- выделить приоритетные процессы, определяющие продукционный потенциал морских водоемов, и на этом основании дать рекомендации по рациональному природопользованию и охране окружающей среды в их бассейнах и на морских акваториях;
- исследовать динамику нефтяных разливов под влиянием гидрометеорологических факторов;
- выполнять модельные реконструкции динамики гипотетических нефтяных разливов при различных сценариях синоптических ситуаций, ледовой обстановки, реальной орोगрафии берегов и рельефа морского дна.

Вопросы

1. Цель и задачи математического моделирования морских экосистем.
2. Типы математических моделей и принципы их построения.
3. Модели биохимических процессов в море.
4. Биогидрохимические циклы каких биогенных элементов участвуют в экологических моделях?
5. Какие формы N, P, Si, присутствующие в водной среде и донных осадках, включены в гидроэкологическую модель А. В. Леонова?
6. Какие процессы учитываются в модели А. В. Леонова при описании динамики биомасс микроорганизмов (гетеротрофных бактерий, фито- и зоопланктона)?
7. Какие наиболее важные проблемы качества природных вод могут изучаться с помощью гидроэкологической модели?
8. Какие показатели состояния водной среды могут быть вычислены с помощью модели?
9. Как используются гидродинамические модели в экологических целях?

Рекомендуемая литература

1. Айзатулин, Т. А. Океан. Активные поверхности и жизнь / Под ред. чл.-корр. АН УССР В. И. Беляева / Т. А. Айзатулин, В. А. Лебедев, К. М. Хайлов. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 192 с.
2. Анисимов, М. В. Глобальный океанский конвейер / М. В. Анисимов, Ю. А. Иванов, М. М. Субботина // Океанология. – 2002. – Т. 42. – № 5. – С. 645–649.
3. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / Под ред. Н. И. Коронкевича и И. С. Зайцевой. – М.: Наука, 2003. – 237 с.
4. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. проф. И. А. Шикломанова. – СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. – 598 с.
5. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. – М.: Наука, 1986. – 365 с.
6. Воробьев, Ю. А. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы / Ю. А. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. – М.: «ДЭКС-ПРЕСС», 2003. – 352 с.
7. Глазовский, Н. Ф. Аральский кризис / Н. Ф. Глазовский // Природа. – 1990. – №10, 11. – С. 11–20; 91–98.
8. Глобальные и региональные изменения климата и их природные и социально-экономические последствия / Под ред. В. М. Котлякова. – М.: ГЕОС, 2000. – 262 с.
9. Глобальные изменения природной среды (климат и водный режим). – М.: «Научный мир», 2000.
10. Данилов-Данильян, В. И. Перед главным вызовом цивилизации. Взгляд из России / В. И. Данилов-Данильян, К. С. Лосев, И. Е. Рейф. – М.: «Инфра-М», 2005.
11. Динамические модели пелагических экосистем. Модели океанских процессов / Под ред. М. Е. Виноградова, А. С. Моница, Д. Г. Сеидова. – М.: Наука, 1989. – С. 252.
12. Добролюбов, С. А. Глобальная циркуляция вод океанов / С. А. Добролюбов // Изв. РАН. Сер. геогр. – 2005. – № 1. – С. 33–41.
13. Добролюбов, С. А. Россия в международных программах исследования Мирового океана / С. А. Добролюбов, Д. Я. Фашук // Изв. РАН. Сер. геогр. – 2010. – № 2. – С. 7–16.
14. Долотов, Ю. С. Проблемы рационального использования и охраны прибрежных областей Мирового океана / Ю. С. Долотов. – М.: Научный мир, 1996. – 304 с.
15. Израэль, Ю. А. Антропогенная экология океана / Ю. А. Израэль, А. В. Цыбань. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 528 с.
16. Каплин, П. А. Изменения уровня морей России и развитие берегов: прошлое, настоящее, будущее / П. А. Каплин, А. О. Селиванов. – М.: «ГЕОС», 1999. – 298 с.
17. Кислов, А. В. Климат в прошлом, настоящем и будущем /

- А. В. Кислов. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 350 с.
18. Колобаев, А. Н. Рациональное использование и охрана водных ресурсов / А. Н. Колобаев. – Минск, 2005. – 170 с.
19. Котляков, В. М. Мир снега и льда / В. М. Котляков. – М.: ВО «Наука», 1994. – 285 с.
20. Лаппо, С. С. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан–атмосфера и энергоактивные области Мирового океана / С. С. Лаппо, С. К. Гулев, А. Е. Рождественский. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 336 с.
21. Леонов, А. В. Моделирование природных процессов на основе имитационной модели трансформации соединений С, N, P, Si / А. В. Леонов. – Южно-Сахалинск: изд-во СахГУ, 2008. – 168 с.
22. Медоуз, Д., Рандерс, Й. Пределы роста / Д. Медоуз, Й. Рандерс. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 343 с.
23. Митина, Н. Н. Геоэкологические исследования ландшафтов морских мелководий / Н. Н. Митина. – М.: Наука, 2005. – 206 с.
24. Михайлов, В. Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее / В. Н. Михайлов. – М.: ГЕОС, 1997. – 413 с.
25. Монин, А. С. Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы / А. С. Монин, Д. М. Сонечкин. – М.: Наука, 2005. – 191 с.
26. Национальный атлас России // Федеральное агентство геодезии и картографии (РОСКАРТОГРАФИЯ). – 2008. – Т. 2: Природа. Экология. – 575 с.
27. Никаноров, А. М. Научные основы мониторинга качества вод / А. М. Никаноров. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – 576 с.
28. Новиков, Ю. В. Методы исследования качества воды водоемов / Ю. В. Новиков, К. О. Ласточкина, З. Н. Болдина. – М.: Медицина, 1990. – 400 с.
29. Обобщенный перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов. – М., 1990. – 46 с.
30. Овсиенко, С. Н. Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду / С. Н. Овсиенко, С. Н. Зацепя, А. А. Ивченко // Тр. ГОИН. – М.: Гидрометеиздат, 2001. – Вып. 209. – С. 248–271.
31. Оценка и регулирование качества окружающей природной среды: учеб. пособие для инженеров-экологов. – М.: изд. дом «Прибой», 1996. – 347 с.
32. Пищальник, В. М. Моделирование природных процессов на основе ГИС «Сахалинский шельф» / В. М. Пищальник, А. О. Бобков. – Южно-Сахалинск: изд-во СахГУ, 2008. – 104 с.
33. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. – Т. IX: Охотское море. – Вып. 1. – Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1998. – 342 с.
34. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. – Т. IX: Охотское море. – Вып. 2. – Гидрохимические условия и оке-

аналогические основы формирования биологической продуктивности. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 168 с.

35. Руководство по составлению карт экологических ситуаций. – М., 1992. – С. 56.

36. Рычагов, Г. И. Плейстоценовая история Каспийского моря / Г. И. Рычагов. – М.: изд-во МГУ, 1997. – 287 с.

37. Смит, Дж. М. Модели в экологии / Дж. М. Смит. – М.: Мир, 1976. – 138 с.

38. Сапожников, В. В. Условия появления сероводорода в глубоководных котловинах Среднего и Южного Каспия / В. В. Сапожников, А. А. Белов // Океанология. – 2003. – Т. 43. – № 3. – С. 502–504.

39. Симонов, А. И. Гидрология и гидрохимия устьевого взморья / А. И. Симонов. – М.: Гидрометеиздат, 1969. – 230 с.

40. Справочник по гидрохимии / Под ред. А. М. Никанорова. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 392 с.

41. Тварковский, Л. С. Охрана живых морских ресурсов российского Дальнего Востока (вторая половина XIX –XX в.) / Л. С. Тварковский, И. Г. Минервин. – Н. Новгород; – М.: изд-во Волго-Вятской акад. госслужбы; изд-во МНЭПУ, 2002. – 154 с.

42. Фащук, Д. Я. Антропогенная нагрузка на геосистему «море–водосбор» и ее последствия для рыбного хозяйства (методы диагноза и прогноза на примере Черного моря) / Д. Я. Фащук, В. В. Сапожников. – М.: ВНИРО, 1999. – 124 с.

43. Фащук, Д. Я. Геоэкологические аспекты моделирования состояния морских водоемов / Д. Я. Фащук, О. В. Чичерина, А. В. Леонов // Изв. РАН. Сер. геогр. – 2005. – № 2. – С. 26–37.

44. Христофорова, Н. К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами / Н. К. Христофорова. – Л.: Наука, 1989. – 192 с.

45. Чепальга, А. Л. Палеоэкологические реконструкции древних бассейнов // Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Европы за последние 130000 лет / Под ред. А. А. Величко / А. Л. Чепальга. – М.: «ГЕОС», 2002. – 232 с.