

ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Академик РАН В.Г. Бондур¹, д.ф.-м.н. В.Ф. Крапивин², к.т.н. И.И. Потапов³, В.Ю. Солдатов²

¹ Центр проблем аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС» РАН

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН)

³ Всероссийский Институт научной и технической информации РАН

Рассмотрены задачи мониторинга и прогнозирования природных катастроф. Особое внимание уделено синтезу систем мониторинга окружающей среды, обеспечивающих сбор, хранение и обработку необходимой информации для решения этих задач. Развивается новая концепция синтеза систем аэрокосмического мониторинга, основанная на алгоритмах и методах экоинформатики и состоящая в совместном использовании информационных технологий и моделей эволюции подсистем окружающей среды. Анализируются конкретные ситуации возникновения природных катастроф.

Ключевые слова: катастрофа, мониторинг, общество, прогноз, модель, риск

NATURAL DISASTERS AND THE ENVIRONMENT

V.G. Bondur, V.F. Krapivin, I.I. Potapov, and V.Yu. Soldatov

The problems of monitoring and forecasting of natural disasters are considered. Specific attention is given to the synthesis of environmental monitoring systems that can assemble, storage and processing of necessary information to solve these problems. New conception of the synthesis of aerospace monitoring systems is developed basing on algorithms and ecoinformatics methods and that consists in the combined use of information technologies and models of environmental systems evolution. Concrete situations of natural disasters arising are analyzed.

Keywords: catastrophe, monitoring, society, prognosis, model, risk

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

1.1. Природная катастрофа как динамическая категория явлений окружающей среды

Природная катастрофа представляет собой стихийное бедствие, приводящее к гибели людей и крупному экономическому ущербу (Бондур и др., 2009). К таким последствиям часто приводят землетрясения, оползни, снежные лавины, обвалы, сходы ледников, наводнения, извержения вулканов, лесные пожары, грозы, торнадо, штормы, жара, ураганы и т.д.

Как справедливо замечает Walker (2003) понятие природной катастрофы является весьма расплывчатым и его определение зависит от многих факторов. Григорьев и Кондратьев (2001) определяют природную катастрофу как «чрезвычайную и бедственную ситуацию в жизнедеятельности населения, вызванную существенными неблагоприятными изменениями в окружающей среде», или «как скачкообразные изменения в системе, возникающие в виде ее внезапного ответа на плавные изменения внешних условий». Количество таких критических ситуаций в окружающей среде возрастает. Например, если до 1990 г. за все 30 предшествующих лет на территории США только в 1973 г. было зарегистрировано более тысячи торнадо, то в последующие годы этот порог превышается ежегодно. Аналогичная ситуация имеет место и в России. По оценкам Мазура, Иванова (2004) основные материальные потери в России приносят наводнения (~30%), оползни, обвалы и лавины (~21%), ураганы и смерчи (~14%), сели и переработка берегов

водохранилищ и морей (~3%), а также засухи, сильные весенние морозы, грозы и град, землетрясения, гололед и др. (~32%).

К природным катастрофам относятся наводнения, засухи, ураганы, штормы, торнадо, цунами, извержения вулканов, оползни, обвалы, сели, снежные лавины, землетрясения, природные пожары, пылевые бури, сильные морозы, жара, эпидемии, нашествия саранчи и многие другие природные явления. В будущем, этот перечень может расшириться за счет возникновения новых видов природных катастроф, таких как столкновения с космическими телами и порожденных человеком – ядерные катастрофы, резкое изменение магнитного поля земли, чума, биотerrorизм и т.п. Поэтому важно разработать эффективные количественные технологии и критерии, которые бы с высокой надежностью предупреждали о возможности появления опасных катастрофических природных явлений.

Таким образом, понятие природной катастрофы многими авторами ассоциируется с понятием экологической безопасности, которое возникло в связи с необходимостью оценки опасности для населения какой-то территории получить ущерб для здоровья, сооружений или имущества в результате изменений параметров окружающей среды. Эти изменения могут быть вызваны как естественными, так и антропогенными причинами. В первом случае опасность возникает за счет флюктуаций в природных процессах, связанных с изменением синоптической обстановки, возникновением эпидемии или за счет стихийного бедствия. Во втором случае опасность появляется как реакция природы на действия человека. Например, Gardner (2002) анализируя изменения природной среды в Гималаях на территории Индии, приходит к выводу, что такие факторы, как обезлесивание и изменение растительного покрова стали возбудителями и усилителями нестабильностей в этом регионе, характеризующихся деградацией земельных ресурсов и возрастанием последствий разрушения природной среды за счет водных потоков. Field и Raupach (2004) и Abrahamson (1989) связывают изменение закономерностей появления природных катастроф с нарастанием нестабильности в системе *углерод-климат-человек*. Согласно Field *et al.* (2002) такая нестабильность в значительной степени в ближайшие два десятилетия может усиливаться за счет изменения многих характеристик экосистем Мирового океана. Milne (2004), анализируя историю различных крупных природных катастроф приходит к пессимистическому прогнозу относительно судьбы всего человечества, используя понятие «день страшного суда».

В общем случае возникновение экологической опасности на данной территории является следствием отклонения параметров среды обитания человека за пределы, где при длительном пребывании живой организм начинает изменяться по направлению, не соответствующему естественному процессу эволюции. По существу понятия «экологическая опасность» или «экологическая безопасность» связаны с понятиями устойчивости, живучести и целостности биосферы и ее элементов. Более того, система «природа-общество» (СПО), являясь самоорганизующейся и самоструктурирующейся системой и развиваясь по законам эволюции, создает внутри себя совокупности экологических ниш, степень приемлемости которых для населения данной территории определяется, как правило, национальными критериями (совокупность ПДК, религиозные догмы, национальные традиции и т.п.).

Тем не менее, при рассмотрении перспектив жизнеобитания на Земле необходимо исходить из общечеловеческих критериев оценки уровней деградации окружающей среды, так как с течением времени локальные и региональные изменения в окружающей среде переходят в глобальные. Амплитуды этих изменений определяются механизмами функционирования СПО, которые обеспечивают оптимальность изменения ее элементов. Человечество все больше и больше отклоняется от этой оптимальности в своей стратегии взаимодействия с окружающими его косными, абиотическими и биотическими компонентами природной окружающей среды. Но в тоже время человеческое общество как элемент СПО осознанно пытается понять характер крупномасштабных взаимоотношений с

природой, направляя на это усилия многих наук и изучая причинно-следственные связи в этой системе.

Одним из примеров таких причинно-следственных связей является корреляция Эль-Ниньо с озоновым слоем. Эль-Ниньо относится к природным явлениям, имеющим непосредственное отношение к стихийным бедствиям, происходящим в экваториальной зоне Восточной части Тихого океана. Оно представляет собой комплекс взаимообусловленных вариаций химических и термобарических параметров атмосферы и океана. Аномальность природных процессов, называемых Эль-Ниньо и наблюдавшихся в основном у берегов Перу и Чили, заключается в резком повышении температуры воды, падении атмосферного давления в восточной части Тихого океана и существенном изменении направленности воздушных потоков. Все это происходит над одним из наиболее активных участков мирового источника дегазации - Восточно-Тихоокеанским поднятием.

Механизм возникновения Эль-Ниньо выглядит примерно следующим образом. Водород, поднимающийся со дна океана из рифтовой зоны достигает поверхности океана и за счет выделения тепла при реакции с кислородом нагревает воду верхнего фотического слоя. В результате снижается растворимость CO_2 и возрастает его поток из океана в атмосферу. По оценкам Монина и Шишкова (1991) во время Эль-Ниньо 1982-1983 гг. в атмосферу выделилось 6000 т CO_2 . Дополнительно к этому возрастает испарение воды, что совместно с CO_2 усиливает региональный парниковый эффект. Разогрев воды приводит к зарождению тайфунов, снижению атмосферного давления и нарушению стандартной пассатной схемы атмосферной динамики. Все эти изменения приводят к включению обратных связей, восстанавливающих равновесие природных процессов. Одним из важных регуляторов здесь выступает озоновый слой, разрушение которого в период Эль-Ниньо приводит к возрастанию температурного градиента между экваториальной и южной частями Тихого океана.

Среда обитания человека является сложной динамической системой. Ее устойчивость во времени связана с постоянством структуры, вещественного состава и энергетического баланса, а также со стабильностью ее реакций на одни и те же внешние воздействия. Нарушение устойчивости системы может быть следствием воздействия как пассивных, так и активных внешних сил. Другими словами, в современных условиях природа N и человеческое общество H, составляя единую планетарную систему и имея иерархические структуры ($|N|$, $|H|$), взаимодействуют, преследуя свои цели (N, H). С формальной точки зрения это взаимодействие можно рассматривать как случайный процесс $\eta(x,t)$ с неизвестным законом распределения, представляющим уровень напряженности во взаимоотношениях подсистем N и H или оценивающий состояние одной из них. Здесь $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ – набор идентификационных характеристик подсистем N и H, являющихся компонентами возможного индикатора возникновения природной катастрофы, т.е. отклонения $\eta(x,t)$ за пределы, где состояние подсистемы N становится угрожающим для H. Отсюда следует, что цели и поведения подсистем N и H являются функциями показателя η , в зависимости от которого их поведения могут быть антагонистическими, индифферентными или кооперативными. Основная цель подсистемы H состоит в достижении высокого жизненного уровня с гарантией долговременного выживания в комфортных условиях. Цель и поведение подсистемы N определяется объективными законами экоэволюции. В этом смысле разделение N и H является условным и его можно интерпретировать как разделение множества природных процессов на управляемые и неуправляемые. Ясно, что с ростом плотности населения природные катастрофы будут усиливать ощущение некомфорта, воздействуя на социальные и культурные условия многих регионов.

Не вдаваясь в философские аспекты этого разделения, будем считать системы H и N симметричными в смысле данного выше их описания и открытыми. При этом система H располагает технологиями, наукой, экономическим потенциалом, промышленным и

сельскохозяйственным производствами, социологическим устройством, численностью населения и т.д.. Процесс взаимодействия систем H и N приводит к изменению η , уровень которого влияет на структуру векторов \underline{H} и \bar{H} . В самом деле, существует порог η_{max} , за пределами которого человечество перестает существовать, а природа выживает. Несимметричность подсистем H и N в этом смысле вызывает изменение цели и стратегии системы H . По-видимому, в современных условиях взаимодействия этих систем $\eta \rightarrow \eta_{max}$ довольно быстрыми темпами, а потому отдельные компоненты вектора \underline{H} можно отнести к классу кооперативных.

Поскольку современная социально-экономическая структура мира представлена совокупностью государств, то в качестве функционального элемента системы H разумно рассматривать страну. Функция $\eta(x, t)$ отражает результат взаимодействия стран между собой и с природой. Совокупность результатов этих взаимодействий можно описать матрицей $B = ||b_{ij}||$, каждый элемент которой несет символическую смысловую нагрузку:

$$b_{ij} = \begin{cases} + \text{ при кооперативном поведении;} \\ - \text{ при антагонистических взаимоотношениях;} \\ 0 \text{ при индифферентном поведении.} \end{cases}$$

Изучению закономерностей взаимодействия сложных систем различной природы посвящены многие теории. В рассматриваемом здесь несимметричном случае речь идет о выживании системы H и попытке найти способ оценки будущей динамики системы N . Согласно Подлазову (2001) рефлексивное поведение H поможет, в конечном счете, человечеству найти технологию поведения, способную «соизмерять выгоды и опасность, понимать принципиальные ограничения наших возможностей и своевременно осознавать новые угрозы». Как отмечает Чернавский (2004) человек многогранен и знание его синергетических возможностей в будущем позволит описать систему $H \cup N$ с учетом всех социальных особенностей в их изменчивости при соблюдении границ интегрального мышления человеческого общества. Сложность этого пути вытекает из понимания механизмов самоорганизации и саморегуляции природных систем. Конечно, глубинные смысловые и философские понятия личностной архитектоники, которые следовало бы учитывать при формировании модели живучести, на современном уровне формализованного описания интеллекта остаются за пределами возможностей современной экоинформатики.

1.2. Ранжирование и классификация природных катастроф

Как уже отмечалось, природные катастрофы приводят к гибели людей и крупному экономическому ущербу. К таким последствиям часто приводят, например, землетрясения, оползни, снежные лавины, обвалы, сходы ледников, наводнения, извержения вулканов, лесные пожары, грозы, торнадо, штормы, жара, ураганы и т.д. Многообразие причин, приводящих к возникновению этих стихийных природных явлений, создает определенные трудности в их прогнозировании и тем самым возможность предотвращения больших потерь пока остается весьма низкой. Примером тому является гибель 136 чел. в Северной Осетии при сходе ледника Колка в сентябре 2002 г.

В США, несмотря на развитую систему мониторинга с функциями предупреждения о стихийных бедствиях в 2003 г., грозы вызвали серьезные экономические потери, связанные со страховыми выплатами 7,7 млрд. долларов в 39 штатах. Основными причинами такого ущерба были не столько сами грозы, а сопровождавшие их мощное выпадение градин больших размеров и торнадо. Это были самые большие страховые потери в США от гроз за период с 1950 г. Но прошедший в 2005 году ураган Катрина побил все рекорды, унеся жизни 1833 человек, а пострадали 500 тыс. человек, в то время как экономический ущерб составил порядка 125 млрд. долларов (Beven *et al.*, 2008).

Тем не менее, изучение условий возникновения экстремальных природных явлений позволяет выявить и сформулировать закономерности взаимодействия биологических и

физических подсистем окружающей среды, обеспечив тем самым возможность хотя бы статистического прогноза опасных природных явлений. Табл. 1.1 характеризует разнообразие опасных природных процессов и дает краткое описание механизмов их зарождения и развития.

Таблица 1.1. Классификация опасных природных процессов (Бондур и др., 2009).

Тип опасного природного процесса	Краткая характеристика
Космогенные опасные процессы	Наиболее ярким проявлением космогенных процессов являются <i>магнитные бури</i> . Это сильные возмущения магнитного поля Земли, вызываемые воздействием усиленных потоков солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли. Происходит нарушение биологической ритмики, приводящее к увеличению сердечно-сосудистых заболеваний.
Кометы, астероиды, метеориты и метеорная пыль	В зависимости от размеров космического тела, вошедшего в атмосферу Земли, могут возникать опасности для населения при их падении на сушу или может происходить загрязнение атмосферы метеорной пылью с последствиями для климата планеты. Реальную глобальную опасность представляют астероиды размером свыше 1 км.
Озоновые дыры	Небольшие изменения количества озона в атмосфере могут привести к серьезным изменениям интенсивности ультрафиолетового облучения земной поверхности с непредсказуемыми последствиями для населения.
Торнадо, смерчи, ураганы	Основным поражающим фактором движущихся воздушных масс являются ветровые воздействия, мощность которых принято оценивать по 12-ти бальной шкале Бофорта. Наиболее разрушительные воздействия ветер начинает оказывать при скорости выше 23 м/с. Для градации скорости ветра при торнадо используется 6-ти бальная шкала, начиная от 20 м/с.
Дожди, грозы	Эти гидрометеорологические явления обычно сопровождают ураганы и бури, усиливая разрушения. Выпадение жидких атмосферных осадков в течение нескольких суток создают наводнения, эрозию, сели и оползни в горах. Грозы приводят к гибели людей и повреждениям электросетей, а также вызывают лесные пожары.
Опасные природные явления в атмосфере зимнего времени	Сильный снегопад, метель, гололед, мороз, ледовые явления: гололед, гололедица, обледенение. Эти явления могут нарушать функционирование транспортных магистралей и систем жизнеобеспечения, разрушать постройки и снижать эффективность экономических структур.
Опасные природные явления в атмосфере летнего времени:	Жара, засухи, суховеи. Сильная длительная жара приводит к снижению урожая в сельском хозяйстве, повышает риск возникновения многих заболеваний и лесных пожаров, оказывает истощающее воздействие на запасы воды и снижает плодородие почв.
Метеогенетно-биогенные опасные природные явления	Природные пожары (степные, лесные, подземные) приводят к уничтожению лесных массивов, гибели животных и растений, загрязнению атмосферы, нарушению теплового баланса, эрозии почвы. В ряде случаев природные пожары являются причиной гибели людей.
Гидрологические и гидрогеологические опасные природные процессы	Наводнения (половодья и паводки), зажоры, заторы, наледи, подземные льды, термокарст, ранние прибрежные льды, сплошной ледяной покров в портах, оледенение судов и портовых сооружений, морские и горные льды, тайфуны, сильные волнения на море, ветровой нагон, волновая абразия берегов морей и океанов, колебания уровня грунтовых вод, колебания уровня вод закрытых водоемов, карст, суффозия.
Геологические опасные природные процессы	Тектонические (длительные колебания уровня Мирового океана, извержение вулканов, землетрясения, горные удары, разжижение грунта); геофизические (геопатогенные, радиогенные) и геохимические (ореолы месторождений); склоновые процессы (обвалы, камнепады, осыпи, курумы, оползни, сели, лавины, пульсирующие ледники, плоскостной склоновый смыв, крип, солифлюкция, дефлюкция, просадка лессовых пород, эрозия склонов, эрозия речных берегов); завальные и ледниковые наводнения; ветровая эрозия почв (пыльные бури).

В современных условиях функционирования СПО практически невозможно разделить природные и антропогенные процессы, взаимодействие между которыми в значительной мере определяет динамику многих стихийных бедствий. Уровень этого взаимодействия определяется оснащенностью конкретного региона защитными средствами и готовностью населения к опасностям, связанным с экстремальными событиями. Под

экстремальными событиями понимается любое событие в геофизической системе, характеристики которого приобретают сравнительно большие отклонения от средних значений. Но уровень катастрофичности этих отклонений зависит от восприятия и оценки опасности природного явления населением региона, которые определяются совокупностью экономических, технических и морально-этических параметров. Известно, что население, проживающее в местах, где природные катастрофы случаются с определенной повторяемостью, и население территорий с низкой опасностью появления чрезвычайных ситуаций воспринимают их по-разному, т.е шкалы опасности для них разные.

Опасные природные процессы могут классифицироваться по масштабу проявления, времени, характеру происхождения, по площади проявления, а также по характеру воздействия:

- оказывающие преимущественно разрушительное действие (ураганы, тайфуны, смерчи, землетрясения, нашествие насекомых (саранчи и др.));
- оказывающие преимущественно парализующее (останавливающие) действие для движения транспорта (снегопад, ливень с затоплением, гололед, гроза, туман);
- оказывающие истощающее воздействие (снижают урожай, плодородие почв, запас воды и других природных ресурсов);
- стихийные бедствия, способные вызвать технологические аварии (природно-технические катастрофы) (молнии, гололед, обледенение, биохимическая коррозия и др.).

Некоторые явления могут быть многоплановыми. Например, наводнение может быть разрушительным для города, парализующим — для затопленных автодорог и истощающим — для урожая.

В современном мире природные катастрофы можно разделить на два класса: (1) возникающие по естественным причинам и (2) спровоцированные деятельностью человека. С учетом сильной взаимозависимости антропогенно- и природно- обусловленных факторов выделение этих классов становится все более условным. Тем не менее, разрабатываются различные критерии опасности катастрофического природного явления. Среди них можно указать на понятия "поражающего фактора", "количество погибших", "уровень экономического ущерба" и т.п. Имеются попытки ввести шкалу катастрофичности природного явления, используя совокупность таких показателей, как число погибших и уровень экономического ущерба. Такие шкалы, применяемые во многих странах, имеют различные оценки природных катастроф. В соответствии с критерием ЮНЕП (UNEP - United Nations Environment Programme) такая шкала имеет только две позиции: 1) погибает не менее 10 человек или 2) наносится ущерб свыше 2 млн. долларов. Ясно, что подобная оценка не может быть адекватной реальному уровню катастрофичности природного явления.

Универсальной классификации природных катастроф не существует. Каждый тип природной катастрофы обычно классифицируется по его мощности. Например, согласно международному соглашению тропические циклоны классифицируются по силе ветра: тропические депрессии со скоростью ветра до 63 км/ч, тропические штормы (скорость ветра от 64 до 119 км/ч) и тропические ураганы (тайфуны), при которых скорость ветра превышает 120 км/ч. Торнадо обычно делятся на три группы: слабые (~110 км/ч), сильные (110-205 км/ч) и неистовые (>205 км/ч). Наиболее распространены шкалы Fujita (табл. 1.2) и Saffir-Simpson (табл. 1.3) для классификации торнадо и ураганов соответственно.

Тем не менее, наиболее признанной классификацией природных катастроф по типам и видам является следующая классификация (Владимиров и др., 2002):

- 1) Катастрофы тренда, к которым относятся неблагоприятные изменения климата, вековые изменения уровня моря и абразия берегов.
- 2) Катастрофы экстремума, включающие засухи, заморозки и наводнения.
- 3) Катастрофы срыва, охватывающие наводнения, тропические штормы, землетрясения, извержения вулканов, штормы, торнадо, оползни, цунами, пожары, снежные лавины и сели.

Каждая из этих категорий обусловлена совокупностью процессов в окружающей среде, ранжирование которых по мощности и выделение из них наиболее опасных требует создания таких систем мониторинга окружающей среды, которые бы с высокой вероятностью выделяли факторы развития конкретной природной катастрофы. Хотя механизмы и динамика зарождения природных катастроф различаются, тем не менее существуют общие принципы выявления признаков резкого изменения характеристик окружающей среды, основанные на ГИМС-технологии (Крапивин, Кондратьев, 2002).

Формализованное решение задачи классификации природных катастроф требует введения количественных градаций для процессов в окружающей среде. Такие попытки делаются, например, при определении типов струйных воздушных течений, при создании синоптических карт и при оценке характеристик многих атмосферных явлений. Знание глобальной структуры воздушных течений в ее динамике дает основу для прогнозирования катастрофических явлений атмосферного происхождения. Конечно, многие локальные атмосферные возмущения, такие как грозовые бури, для своего прогнозирования требуют дополнительной информации. Грозы относятся к быстро текущим атмосферным явлениям, возникающим в условиях атмосферной неустойчивости. Достаточно сложно по внешним предвестникам грозы оценить мощность разрядов молний. Для этого необходимо знать распределение размеров жидких и замерзших капель воды в облаках над ограниченной территорией, что связано с большими экономическими затратами при организации соответствующего мониторинга. Технологии такого мониторинга могут базироваться, например, на измерении поляризационных характеристик собственного и рассеянного излучения в микроволновом диапазоне.

Таблица 0.2. Характеристика шкалы Fujita-Pearson

Уровень шкалы	Характер интенсивности	Скорость ветра, км/час	Тип опасности
F0	Буря	40-72	Некоторые повреждения дымовых труб, поломка ветвей на деревьях, выкорчевывание деревьев с поверхностными корнями, срывание вывесок на зданиях.
F1	Умеренный торнадо	73-112	Низший уровень скорости ветра начала урагана. Срывает покрытия с крыш, сносит легкие дома с фундаментов или переворачивает их, перемещает автомобили, отдельно стоящие или пристроенные гаражи может разрушать.
F2	Существенный торнадо	113-157	Значительный уровень опасности. Срывает крыши с домов, разрушает передвижные дома, переворачивает боковые гаражи, ломает или вырывает с корнями большие деревья, уносит легкие объекты.
F3	Сильный торнадо	158-206	Разрушает крыши и стены стационарных построек, переворачивает поезда, вырывает с корнями деревья.
F4	Опустошительный торнадо	207-260	Разрушает фундаментальные дома, сносит на некоторые расстояния дома с плохим фундаментом, уносит автомобили и большие объекты.
F5	Невероятный торнадо	261-318	Срывает дома с фундаментов и уносит их разрушая, переносит автомобили на расстояния до 100 м, уничтожает деревья, стальные укрепленные бетоном структуры сильно повреждаются.
F6	Невообразимый торнадо	319-379	Такие ветры маловероятны. Производимые ими разрушения трудно отличить от разрушений при торнадо типа F4 и F5. Возникающий вихрь имеет огромную мощность на небольшом участке земной поверхности, может забирать большие объемы воды и переносить их на небольшие расстояния.

Таблица 0.3 Шкала Saffir-Simpson для измерения силы урагана.

Категория урагана	Максимальная скорость ветра, м/с	Минимальное атмосферное давление, мб	Величина волнения на море, м
1	33-42	≥ 980	1.0-1.7
2	43-49	979-965	1.8-2.6
3	50-58	964-945	2.7-3.8
4	59-69	944-920	3.9-5.6
5	≥ 70	< 920	≥ 5.7

Проблема оценки грозовой активности тесно связана с исследованием случайного поля Земли, создаваемого атмосферно-электрическими разрядами. Результаты этих исследований важны не только для контроля пожарной опасности на покрытых лесами территориях, но и в радиотехнических приложениях. В работе Ремизова (1985) впервые приводятся данные о глобальном распределении показателя интенсивности грозовой активности для разных сезонов года.

Употребляемая в научной литературе и обыденной жизни классификация природных катастроф фактически связана с типами явлений, происходящих в окружающей среде.

1.3. Динамика природных катастроф

Природные катастрофы в общепринятом их понимании всегда были одним из элементов глобальной экодинамики. Стихийные бедствия и различные природные катаклизмы в прошлом происходили в соответствии с развитием естественных природных трендов, а начиная с XIX столетия на их динамику начали влиять антропогенные факторы. Разворачивание в XX столетии инженерной деятельности и формирование сложной социально-экономической структуры мира резко повысили не только долю антропогенно обусловленных природных катастроф, но и изменили характеристики окружающей среды с приданием им динамики в сторону ухудшения среды обитания живых существ, в том числе и человека. По оценкам Schneider (1995) в историческом прошлом климатические сезонные вариации характеризовались высокой устойчивостью. Сезонный сдвиг за 344 года с 1651 г. не превышал одних суток за столетие. Начиная с 1940 г. в северном полушарии наметилась ярко выраженная аномалия в сезонном сдвиге. Например, в США зима 1994 г. характеризовалась рекордно низкими температурами в восточных штатах, а в июле этого года был установлен рекорд жары на юго-западе страны, когда температура достигала отметки 48.8°C. От жары летом 1994 г. в Индии погибли тысячи людей. Наоборот, вторая половина 1991 г. характеризовалась пониженными температурами, по-видимому, по причине извержения вулкана Mount Pinatubo на Филиппинах в июне 1991 г., когда в атмосферу были выброшены огромные массы пепла. В целом наряду с процессами дестабилизации климата наблюдается рост числа катастрофических явлений. Табл. 1.4 - 1.13 и рис. 1.1 - 1.4 дают некоторое представление о динамике количества природных катастроф и связанных с ними бедствиями. На рис. 1.1 **Ошибка! Источник ссылки не найден.** отражена динамика крупнейших природных катастроф. Число погибших в природных и техногенных катастрофах за 2000-2008 годы показано на рис. 1.2. На рис. 1.3 и 1.4 отражены ущербы, причиненные природными катастрофами за период 1980-2008 годы и показана их структура.

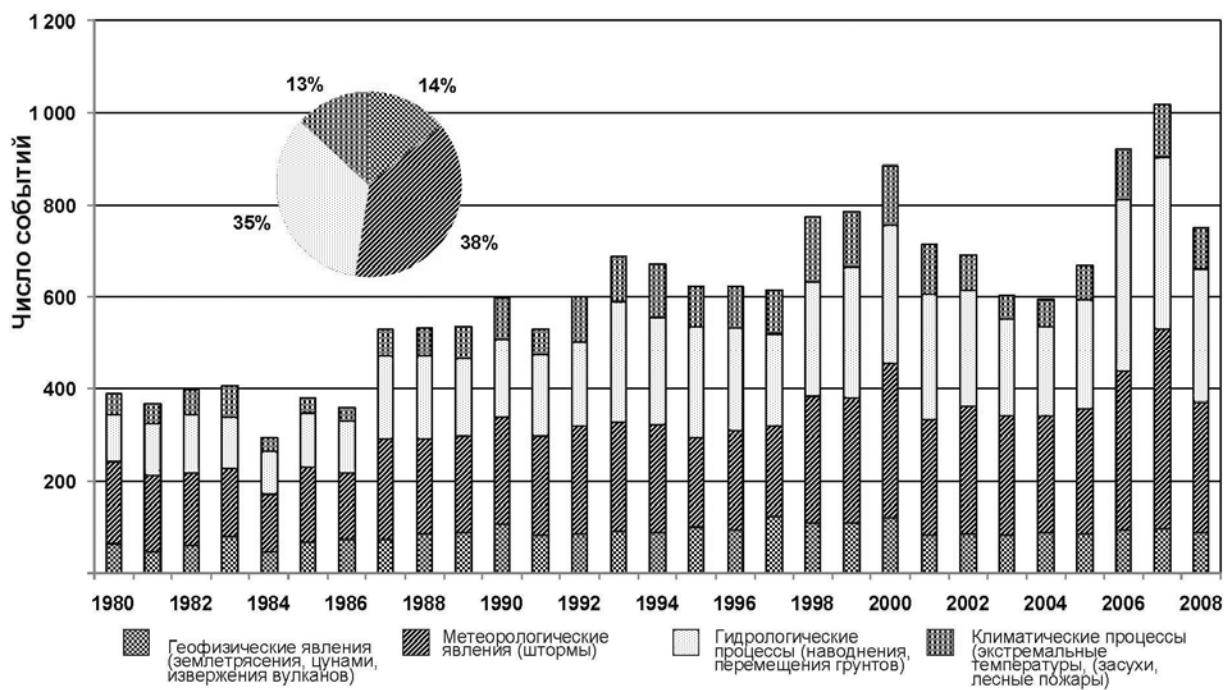


Рис.1.1 Динамика количества природных катастроф
(<http://www.iii.org/media/presentations/naturalcatastrophe2008review>).



Рис.1.2 Число погибших в природных и техногенных катастрофах за 2000-2008 годы по данным Международного Банка Данных Стихийных Бедствий

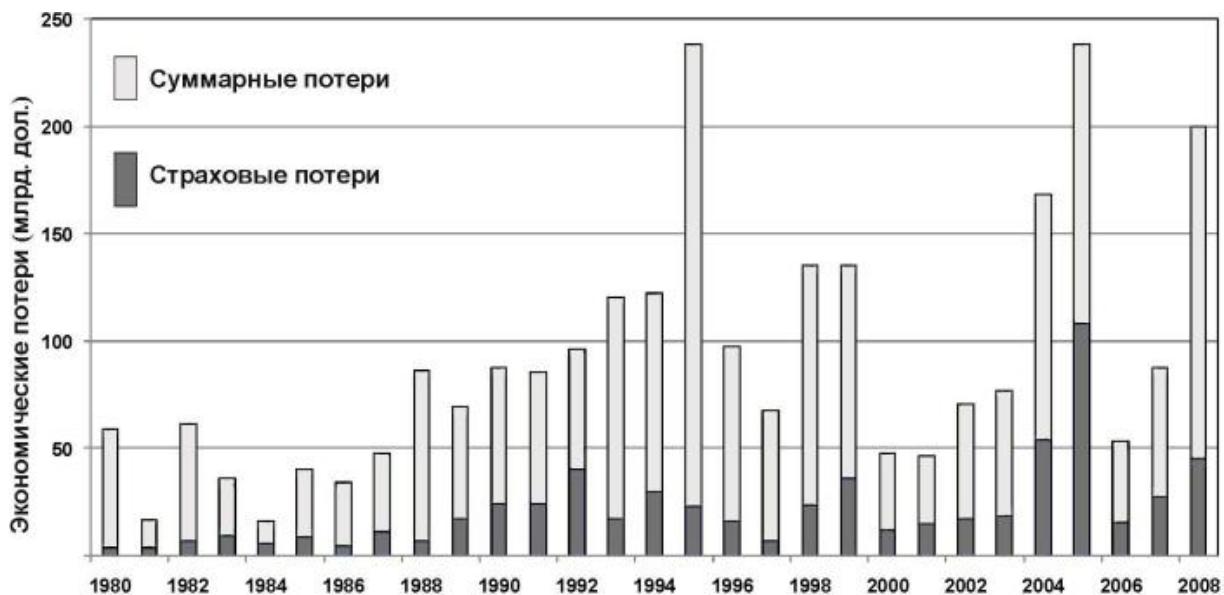


Рис.1.3 Средний ущерб (млрд. долларов) причиненный природными катастрофами за период 1980-2008 гг. (<http://www.iii.org/media/presentations/naturalcatastrophe2008review>).

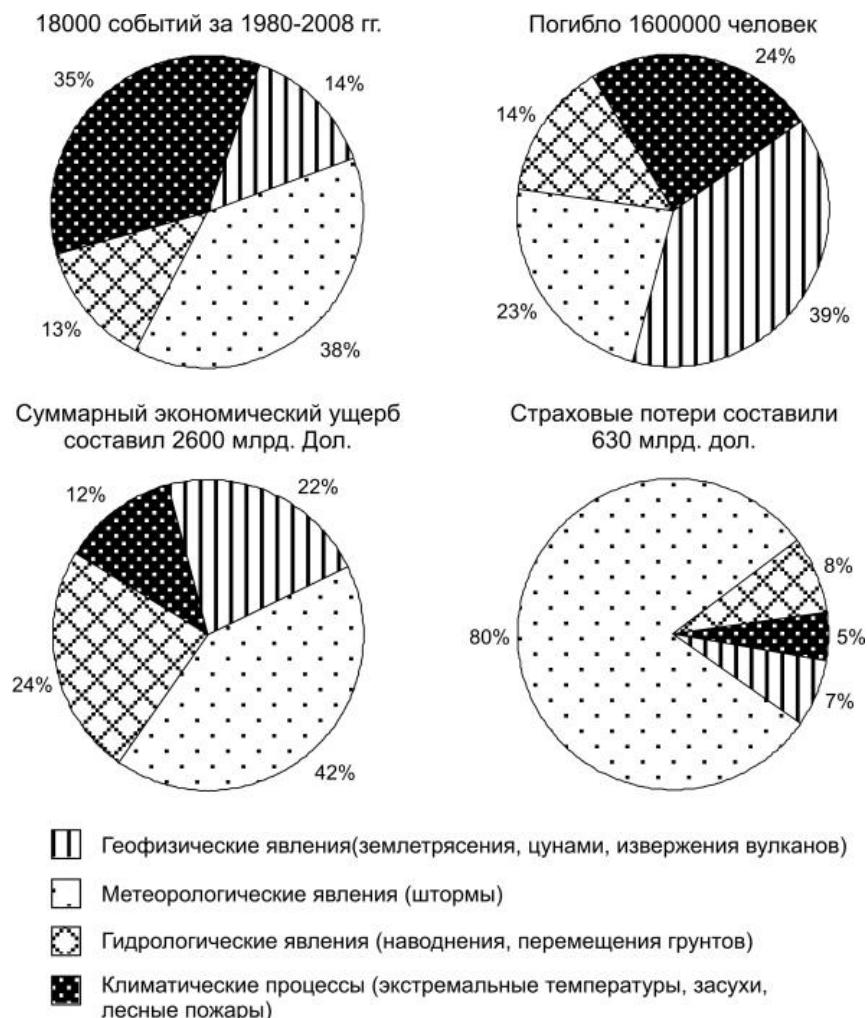


Рис.1.4 Распределение ущербов, причиненных природными катастрофами за 1980-2008 гг. (по данным информационного института страхования при компании Munich Re Inc. за 15 января 2009 г. (Бондар и др., 2009).

Таблица 0.4. Крупные извержения вулканов в истории человечества (Бондур и др., 2009).

Год	Вулкан	Страна	Количество погибших
79	Везувий	Италия	30 000
1586	Келут	Индонезия	10 000
1631	Везувий	Италия	18 000
1669	Этна	Италия	10 000
1783	Парадажан	Индонезия	9 340
1792	Унзен	Япония	15 190
1815	Тамбор	Индонезия	92 000
1815	Сумбава	Индонезия	100 000
1883	Кракатау	О. Ява (Индонезия)	36 420
1902	Бонпеле	О. Мартиника (Франция)	29 500
1902	Санта-Мария	Гватемала	6 000
1919	Келут	Индонезия	5 050
1937	Матури	Новая Гвинея	500
1985	Невадо-дель-Рукис	Колумбия	24 740
1997	Суфриер Хиллз	О. Монтсеррат в Карибском море	19
2000	Попокатепетль	Мексика	Эвакуация 15 000
2002	Эль Ревентадор	Эквадор	Эвакуация 3 000
2005	Картала	Коморы	Пострадали 245000
2006	Тунгурахуа	Эквадор	Пострадали 300013
2008	Невадо дель Хуила	Колумбия	Пострадали 104000

Таблица 0.5. Континентальное распределение природных катастроф и ущерба от них.

Регион Земного шара	Количество природных катастроф		Число человеческих жертв		Экономические потери, млн. долларов. В скобках указаны страховые выплаты.	
	2002 г.	2003 г.	2002 г.	2003 г.	2002 г.	2003 г.
Африка	51	57	661	2778	308 (158)	5158 (0)
Америка	181	206	825	946	13933 (6259)	21969 (13247)
Азия	261	245	8 570	53921	13965 (385)	18230 (600)
Австралия и Океания	69	65	61	47	2192 (11)	628 (246)
Европа	136	126	459	20194	24246 (5897)	18619 (1690)
Весь мир	698	699	10 576	77886	54644 (12750)	64604 (15810)

Таблица 1.6. Распределение числа жертв по типам природных катастроф за период с 1980 по 2008 гг.

Вид природной катастрофы	Количество погибших
Цунами	227 262
Землетрясения	224 016
Тропические циклоны	158 241
Экстремальные температуры	88 062
Эпидемии	47 281
Наводнения	46 978
Лавины, оползни	6 699
Местные бури	3 141
Штормы	2 496
Засуха	1 541
Лесные пожары	359
Извержения вулканов	221

Таблица 0.7. Статистика крупнейших природных катастроф (Бондур и др., 2009).

Годы	1950-59	1960-69	1970-79	1980-89	1990-99	1992-2002	1998-2008
Число природных катастроф	20	27	47	63	91	70	83
Экономические потери, млрд. долларов	42,1	75,5	138,4	213,9	659,9	550,9	566,8

Таблица 0.8. Наиболее значимые природные катастрофы, произошедшие в 2007 г.

Дата	Страна/регион	Событие	Потери	
			Человеческих жизней	Экономические (млн дол.)
16 июля	Япония	Землетрясение	11	12500
18-20 января	Европа	Зимний ураган Kirill	49	10000
Июнь-август	Китай	Наводнения	65	6800
Июнь	Англия	Наводнения	4	4000
Июль	Англия	Наводнения	1	4000
4-8 июня	Оман	Циклон Gonu	70	3900
28 октября-6 ноября	Мексика	Наводнения	22	3000
Октябрь	США	Лесные пожары	8	2500
15-17 ноября	Бангладеш, Индия	Циклон Sidr	3300	2300
13-17 апреля	США	Зимний ураган	23	2000

Как видно из табл. 1.4, вулканическая активность планеты Земля постоянно вызывает множество человеческих жертв. В целом ущербы от всех природных катастроф согласно табл. 1.5 по континентам распределены неравномерно. Наибольшие потери приходятся на Азию.

В историческом аспекте существует множество сведений о природных катастрофах в различных частях планеты Земля. Конечно, полной картины катастрофологии воссоздать невозможно, так как описание, хронология и характеристика 154 аномальных природных явлений, зафиксированных учеными и летописцами в период с I в. до н.э. и по VII в. н.э., отличаются от современных как уровнем их восприятия, так и описанием без привязки к формализованным шкалам. Например, в современных условиях такое природное явление как Солнечное затмение, уже не относится к природным катастрофам в отличие от периода древности и раннего средневековья. Тем не менее, типы и характер природных катастроф с тех времен практически не изменились. Среди специалистов, изучающих историю Земли как планеты, существуют различные гипотезы о происходивших на ней катастрофах. Так Walker (2003) излагает гипотезу "снежной Земли", полагая, что наблюдаемые нами природные аномалии являются слабыми шумами на фоне исторических сигналов с амплитудой от полного покрытия планеты километровым слоем льда и снега до состояния парника.

Приведенные в табл. 1.6 данные позволяют ранжировать потери от природных катастроф. Видно, что наибольшие потери человеческих жизней вызывают природные катастрофы, связанные с Мировым океаном. С учетом отмеченного в табл. 1.7 нарастания числа катастроф возникает острая необходимость в развитии таких методов и технологий, которые бы приводили к снижению этих потерь.

Ежегодно на Земном шаре среди множества природных катастроф выделяются наиболее значимые, как по человеческим жертвам, так и по экономическому ущербу. В табл. 1.8 приведен пример таких катастроф, произошедших в 2007 г., когда их общее число достигло 960. В последующем 2008 г. число природных катастроф снизилось до 750, но ряд циклонов и землетрясений, особенно в Азиатском регионе, вызвали повышение экономических ущербов примерно на 50% по сравнению с предыдущим годом. Такая статистика и ее анализ важны для использования моделей, обеспечивающих

параметризацию тенденций и способствующих выявлению закономерностей в динамике количества природных катастроф (рис. 1.1). Некоторые фрагменты данных об этой динамике приведены в табл. 1.9 и 1.10.

Таблица 0.9. Крупнейшие землетрясения в истории человечества (Григорьев, Кондратьев, 2001).

Год	Регион	Число погибших, тыс. чел
365	Восточное Средиземноморье. Сирия	50
844	Сирия (Дамаск)	50
893	Армения	100
893	Индия	180
1138	Сирия	100
1268	Турция (Семдзия)	60
1290	Китай (prov. Джили)	100
1456	Италия (Неаполь)	60
1556	Китай (prov. Шеньси)	830
1626	Италия (Неаполь)	70
1667	Азербайджан (Шемаха)	80
1668	Китай (Шаньдун)	50
1693	Италия (Сицилия)	60
1727	Иран (Тебриз)	77
1730	Япония (Хоккайдо)	137
1737	Индия (Бенгалуру, Калькутта)	300
1739	Китай (prov. Нинся)	50
1755	Португалия (Лиссабон)	60
1783	Италия (Калабрия)	50
1868	Эквадор (Ибарра)	70
1908	Италия (Мессина)	120(47-82,50)
1920	Китай (prov. Ганьсию)	180
1920	Китай (prov. Нинся)	200
1923	Япония (Канто)	140
1923	Япония (Токио)	99,3
1932	Китай (prov. Гансю)	70
1935	Пакистан (Кветта)	60
1948	Туркмения (Ашхабад)	110
1957	Гоби-Алтайское (Монголия, Бурятия, Иркутская и Читинская обл.)	0
1970	Перу (Чимботе)	67
1970	Иран	40
1976	Китай (prov. Тяньшань)	242,8
1976	Гватемала	22,085
1978	Иран	20
1985	Мексика	10
1988	Армения	25
1988	Турция	25
1990	Иран (западная часть)	40
1995	Япония	6
1999	Нефтегорское землетрясение, Россия	2
2002	Аляска, США	0
2002	Афганистан	1
2003	Иран (юго-восток)	26,796
2003	Алжир	2,266
2004	Юго-Восточная Азия	232
2004	О-ва Суматра-Андаман	283,106
2005	Индонезия, Малайзия	2
2005	Северная часть о-ва Суматра	1313
2005	Пакистан	73,338
2006	О-в Ява, Индонезия	5,749
2007	О-в Суматра, Индонезия	0,068
2008	Китай	87,476

Таблица 1.10. Динамика природных и антропогенно инициированных катастроф (Enz, 2006; Enz *et al.*, 2008).

Год	Число природных катастроф	Антропогенные катастрофы
1970	32	62
1971	39	72
1972	37	87
1973	28	83
1974	36	81
1975	41	71
1976	44	80
1977	40	82
1978	39	70
1979	46	79
1980	43	83
1981	55	74
1982	60	73
1983	55	82
1984	49	61
1985	60	75
1986	64	86
1987	95	115
1988	89	121
1989	78	129
1990	115	135
1991	106	145
1992	121	129
1993	139	170
1994	145	178
1995	136	141
1996	130	176
1997	125	171
1998	126	160
1999	141	148
2000	128	168
2001	123	162
2002	133	147
2003	143	161
2004	119	229
2005	152	256
2006	136	213
2007	142	193
2008	154	221

Таблица 1.11. Экономическая уязвимость стран перед лицом крупных природных катастроф (за последние 27 лет XX века) (Осипов, 2001).

Показатели	Отсталые страны	Развивающиеся страны	Страны «золотого миллиарда»
Количество крупных природных катастроф, тыс.	1524	1714	1341
Количество пострадавших, млн. человек	2775	216	16
Среднее отношение экономических потерь к национальному ВВП, %	22	10	4

Знание динамики количества природных катастроф в каждом регионе позволяет выработать политику по защите населения и экономики от больших потерь при возникновении природных катастроф. Как видно из табл. 1.11 и 1.13, хотя уязвимость различных стран при природных катастрофах зависит от уровня экономического развития, тем не менее, согласно данным табл. 1.12 потери человеческих жизней и экономический ущерб не достигают нулевой отметки даже в таком индустриально развитом регионе, как территория США.

Таблица 0.12. Последствия тропических циклонов для США за 2000-2008 гг. (Brennan *et al.*, 2008).

Начало	Конец	Название	Штат	Жертвы	Пострадавшие	Общий ущерб (US\$ Million)
12.09.2008	16.09.2008	IKE	Техас	82	200000	30000
01.09.2008	01.09.2008	GUSTAV	Луизиана, Миссисипи	43	2100000	7000
16.08.2007	19.08.2007	ERIN	Техас, Оклахома, Миссури...	7		
02.08.2006	07.09.2006	ERNESTO	Южная Каролина, Северная Каролина.	6	140	32.86
24.10.2005	24.10.2005	WILMA	Флорида	4	30000	14300
23.09.2005	01.10.2005	RITA	Луизиана, Техас, Миссисипи	10	300000	16000
29.08.2005	19.09.2005	KATRINA	Луизиана, Флорида	1833	500000	125000
10.07.2005	10.07.2005	DENNIS	Флорида, Джорджия	5		2230
25.09.2004	26.09.2004	JEANNE	Флорида	6	40000	8000
15.09.2004	16.09.2004	IVAN	Алабама, Луизиана, Миссисипи	52		18000
05.09.2004	05.09.2004	FRANCES	Флорида ...	47	5000000	11000
29.08.2004	30.08.2004	GASTON	Вирджиния	7		62.5
13.08.2004	13.08.2004	CHARLEY	Флорида	10	30000	16000
30.06.2003	30.06.2003	BILL	Луизиана, Миссисипи		4	16
18.09.2003	22.09.2003	ISABEL	Северная Каролина, Maryland, ...	16	225000	3370
03.10.2002	03.10.2002	LILI	Луизиана			2000
27.09.2002	27.09.2002	ISIDORE	Луизиана, Миссисипи	1	13200	300
05.06.2001	17.06.2001	ALLISON	Техас, Луизиана, Флорида ...	41	172000	6000

Так по оценкам Norton (2002) в XVIII в. на территории Англии произошло 7 значительных природных катастроф, отрывочные сведения о которых не позволяют достоверно оценить их масштабы, но, тем не менее, известно, что над территорией Англии несколько раз бушевали мощные ураганы с ливнями и грозами, вызывая сильные разрушения и приводя к гибели людей. Например, в 1703 г. над Лондоном пронесся яростный ураган, который возник мгновенно утром 26 ноября и его неистовые удары продолжались до утра следующего дня, нанося разрушения. На р. Темзе было потоплено около 40 барж и других судов. Обошлось без значительных человеческих жертв, так как жители Лондона успели покинуть свои жилища и укрыться в более безопасных местах. Ураган затихал и возвращался с новой силой в течение последующих двое суток. Аналогичная природная стихия возникала дважды в июле и декабре 1725 г. в Йоркшире и Лондоне соответственно. По сохранившимся описаниям 31 июля со стороны океана появился "огненный корабль", который неожиданно обрушился огнем и водой на людей и их жилища. Многие люди, находившиеся в лодках или на мостах, погибли в разбушевавшейся стихии. В летописях отмечены также мощные наводнения на территории Англии. Так проливные дожди 19 июня 1725 г. вызвали сильные разливы рек практически по всей территории Англии, затопив первые этажи зданий и нанеся значительный материальный ущерб.

В 2005 году был достигнут рекорд: ущерб от стихийных бедствий составил \$204 млрд. Предыдущий рекорд был установлен в 1998 году - он составлял \$112 млрд. Стихия убила 91963 человека и оказала серьезное воздействие (например, лишила крова) на 157 млн. 511 тыс. 938 человек (информация Международного Банка Данных Стихийных Бедствий\International Disaster Database).

Таблица 0.13. Стихийные бедствия, унесшие наибольшее количество жизней за период (2000-2007гг.)

Начало событий	Страна	Вид бедствия	Жертвы	Пострадавшие	Ущерб (млн. \$US)
27.01.2002	Нигерия	Взрыв боеприпасов	1000	20000	
25.03.2002	Афганистан	Землетрясение	1000	91228	
15.07.2006	Нидерланды	сильная жара	1000		
02.02.2006	Египет	Транспортная авария на воде. Паром 'Al-Salam 98'	1028	387	
10.05.2002	Индия	сильная жара	1030		
01.01.2003	Буркина-Фасо	Менингококовая инфекция	1058	7146	
03.07.2007	Индия	Наводнение	1103	18700000	
21.07.2007	Бангладеш	Наводнение	1110	13771380	100
17.02.2006	Филиппины	Оползень	1126	5926	2,203
01.07.2007	Сомали	Бактериальная инфекция. Холера	1133	35687	
26.09.2002	Сенегал	Транспортная авария на воде. Паром 'Joola'	1200		
24.07.2005	Индия	Наводнение	1200	20000055	3330
08.10.2005	Индия	Землетрясение	1309	156622	1000
01.01.2008	Афганистан	Местная Буря	1317	170684	
15.07.2006	Франция	сильная жара	1388		
30.11.2006	Филиппины	Тропический циклон. Durian (Reming)	1399	2562517	66,4
01.12.2001	Буркина-Фасо	Менингококовая инфекция	1447	11140	
01.01.2007	Буркина-Фасо	Менингококовая инфекция	1490	20765	
01.10.2005	Гватемала	Тропический циклон Stan	1513	475314	988,3
01.01.2001	Буркина-Фасо	Менингококовая инфекция	1525	9372	
29.11.2004	Филиппины	Тропический циклон Winnie	1619	881023	78,2
29.08.2005	США	Тропический циклон Katrina	1833	500000	125000
01.12.2002	Заир. Конго	Вирусная инфекция. Грипп	2000	500000	
21.05.2003	Алжир	Землетрясение	2266	210261	5000
13.02.2006	Ангола	Бактериальная инфекция.Холера	2354	57570	
10.04.2002	Афганистан	Эпидемия	2500		
23.05.2004	Гаити	Общее Наводнения	2665	31283	
17.09.2004	Гаити	Тропический циклон Jeanne	2754	315594	50
15.11.2007	Бангладеш	Тропический циклон Sidr	4234	8978541	2300
27.05.2006	Индонезия	Землетрясение	5778	3177923	3100
26.12.2004	Тайланд	Цунами	8345	67007	1000
26.12.2004	Индия	Цунами	16389	654512	1022,8
26.01.2001	Индия	Землетрясение	20005	6321812	2623
26.12.2003	Иран	Землетрясение	26796	267628	500
26.12.2004	Шри-Ланка	Цунами	35399	1019306	1316,5
01.08.2003	Европа	сильная жара	70144		
08.10.2005	Пакистан	Землетрясение	73338	5128000	5200
12.05.2008	Китай	Землетрясение	87476	45976596	30000
02.05.2008	Мьянма	Тропический циклон Nargis	133655	2400000	
26.12.2004	Индонезия	Цунами	165708	532898	4451,6

Грозами сопровождаются многие ураганы и бури. Грозовая активность присутствует практически во всех широтах. Ущербы, наносимые грозами, проявляются через лесные пожары и прямое повреждение различных коммуникаций и человеческие жертвы. Например, на территории США в 1974 г. только за 3-4 апреля погибло 320 человек, а экономический ущерб оценен в 1,7 млрд. долларов. В последующие годы отмечены два случая больших человеческих потерь в мае 1999 г. и 2000 г., когда погибло 42 и 51 человек соответственно. Грозовые бури, следовавшие одна за другой по штатам Канзас, Оклахома и Теннеси со 2 по 11 мая нанесли материальный ущерб в 3,205 млрд. долларов.

1.3.1. Землетрясения

За всю историю человечества значительный ущерб наносился землетрясениями, как наиболее грозными и менее всего прогнозируемыми природными явлениями. При землетрясении образуется масштабный очаг поражения, территория которого характеризуется обширными разрушениями зданий и сооружений. Гибель людей в основном происходит за счет физических воздействий элементами разрушенных построек. Количество погибших зависит от сейсмоустойчивости зданий, времени суток и наличия предупреждения о возможности землетрясения. Так землетрясение в Иране 26 декабря 2003 г. (магнитуда 6,6) унесло около 25 тыс. жизней и было ранено почти 30 тыс. человек. Очень часто происходят землетрясения в Индонезии. Индонезия находится в самой сейсмически активной зоне планеты и является частью так называемого "тихоокеанского огненного кольца" – мощного тектонического разлома. Ежегодно сейсмологи регистрируют в Индонезии около 7 тысяч землетрясений магнитудой выше 4,0 по шкале Рихтера. В этом районе земного шара располагаются самые активные тектонические плиты, одна из которых передвигается со скоростью семь сантиметров в год. Так 28 марта 2005 года в результате землетрясения с магнитудой 8,7 по шкале Рихтера на островах Ниас и Симелуэ близ Суматры погибли 1 тысяча 300 человек. 27 мая 2006 года произошло землетрясение в центральной части индонезийского острова Ява. Число жертв землетрясения достигло 6 тысяч человек. В тоже время достаточно сильные землетрясения (магнитуда 6,5), происходящие с регулярностью один раз в 10 лет в другом сейсмическом регионе штата Калифорния (США), в большинстве случаев обходятся без жертв и заметных разрушений. Такой контраст в большей степени объясняется различной защищенностью населения этих территорий и приспособленностью их инфраструктуры к преодолению последствий землетрясений. Иран находится в сейсмически активной зоне между Арабской и Евразийской плитами. Здесь высокая плотность населения и построек, слабо приспособленных к землетрясениям. Последнее столетие здесь зарегистрировано шесть крупных землетрясений, при которых погибало не менее 5 тыс. человек. А при землетрясении в 1990 г. на побережье Каспийского моря погибло 40 тыс. человек. В России наиболее сейсмоактивные зоны расположены на Дальнем Востоке, где с регулярностью регистрируются сейсмические события, многие из которых носят разрушительный характер. Среди них можно отметить такие, как Шикотанское землетрясение и трагедия в Нефтеюргске в 1995 г. (Соболев, 2000). Многие землетрясения происходят в мало населенной местности и поэтому не приносят больших экономических ущербов и не вызывают жертвы среди населения.

Григорьев и Кондратьев (2001) приводят достаточно детальную хронологию землетрясений в истории цивилизации, начиная с библейских сведений и легенд, на основе которых формируется картина гибели многих городов. По отрывочным сведениям и раскопкам многие исследователи воссоздают картины прошлых геологических процессов, связанных с подвижками горных пород и вызванных ими землетрясений. Совокупностью таких процессов объясняются многие случаи опускания на дно морей населенных пунктов, находившихся на берегах Черного и Средиземного морей. До сих пор идут споры о фактических причинах, приведших к затоплению океаном двух городов у берегов Индии (Delgado, 1998).

Перечень самых разрушительных землетрясений в истории человечества приведен в табл. 1.9. Эти катастрофические и другие менее масштабные землетрясения, как правило, сопровождаются серьезными экономическими потерями и жертвами. Только за период с 1900 г. по 1989 г. в результате землетрясений в мире погибло около 1,2 млн. человек. Распределение землетрясений и их последствий во времени не поддается четкой параметризации. Так, если в 80-е годы от землетрясений в мире погибло около 57,5 тыс. человек, то только за один 1990 год количество жертв составило 52 тыс. человек. В целом статистика землетрясений очень неоднородна. Десятилетний период 1980-1990 гг., например, характеризуется временной высокой плотностью разрушительных землетрясений. Их насчитывается 170 и они охватывают 43 государства. За этот период больше всего погибло людей в Азии (86212 чел.). По числу жертв далее идут СССР (25392 чел.), Северная и Центральная Америка (11313 чел.), Африка (5070 чел.), Европа (3253 чел.), Южная Америка (2506 чел.), Австралия и Океания (459 чел.). В табл. 1.10 дается некоторая характеристика указанного периода времени.

По количеству землетрясений и их последствиям год от года отличается. Так в 2002 г. на земном шаре было зарегистрировано около 70 землетрясений, в результате которых были человеческие жертвы и разрушения. В частности, несколько землетрясений произошли на территории Афганистана, среди которых мартовское землетрясение в горах Хинду Куша унесло более чем 2000 жизней. Землетрясение средней мощности 31 октября 2002 г. в Италии в местечке Молизе разрушило школу и вызвало серьезную озабоченность населения центральной части страны по поводу качества строительства. Сильнейшее землетрясение с магнитудой 7,9 произошло 3 ноября 2001 г. на Аляске в мало заселенной местности. Только в ноябре 2004 г. отмечено шесть сильных землетрясений: 11 ноября в Индонезии (Кепулайан Алор) с магнитудой 7,5, 15 ноября вблизи западного побережья Колумбии (магнитуда 7,2), 20 ноября в Коста Рике (магнитуда 6,4), 22 ноября на западном побережье Новой Зеландии (магнитуда 7,1), и 26 ноября в Индонезии (Папуа) с магнитудой 7,2. В целом за 2004 г. зарегистрировано более 40 землетрясений с магнитудой больше 5 (по данным USGS). Самое мощное землетрясение с магнитудой 9,7 произошло 26 декабря 2004 г. в восточной части Индийского океана. От возникшей 10-метровой волны цунами погибло более 250 тысяч человек, а разрушения приняли гигантские масштабы. Буквально через три месяца 28 марта 2005 г. западное побережье Индонезии, о. Суматра и Малайзия снова подверглись землетрясению с магнитудой 8,7 с эпицентром, расположенным в 350 км юго-восточнее эпицентра землетрясения 26 декабря 2004 г. Погибло около 2000 человек и причинен огромный ущерб этим территориям.

Хотя сейсмоопасные зоны известны, землетрясение может произойти в любом регионе. Координаты сейсмически активных регионов на земном шаре хорошо известны. Землетрясения вызываются внезапным перемещением и трансформацией тектонических плит. Напряжения в верхнем слое суши воздействуют на эти плиты и приводят к изменению потоков энергии, что проявляется в виде колебаний земной поверхности, а в некоторых случаях приводит к извержению вулканов. Так, например, в Калифорнии сталкиваются две платы - тихоокеанская и северо-американская. Их границы достаточно точно определяют зоны сейсмичности в этом регионе. Многие геофизические теории землетрясений основываются на изучении движения тектонических плит. Национальные системы природного мониторинга многих стран одной из функций предусматривают регистрацию сейсмических колебаний грунтовых пород. Амплитуда этих колебаний определяет уровень опасности возникновения землетрясения или появления другой природной катастрофы типа селя или оползня. В сейсмоопасных регионах строительство жилых, производственных и административных сооружений ведется с учетом предыстории землетрясений.

В настоящее время разработано множество методов и средств, используемых для мониторинга сейсмоопасных территорий с целью прогноза землетрясений, в том числе космических (Бондар и др., 2009).

1.3.2. Ураганы, тропические циклоны, штормы

История сохранила много сведений о природных катастрофах, которые в настоящее время называют тропическими циклонами и которые формируются в основном над океанами в тропиках, регулярно обрушиваясь на восточные и приэкваториальные районы материков. Тропические циклоны - это ураганы и тайфуны, встречающиеся в северной и южной частях Тихого океана, в Бенгальском заливе и Аравийском море, в южной части Индийского океана, у берегов Мадагаскара и северо-западного побережья Австралии. Атлантические ураганы в основном формируются в зоне, ограниченной координатами (10°N - 20°N , 20°W - 60°W) и (7.5°N - 17.5°N , 30°W - 100°W). Обычно тропическим циклонам присваиваются имена. В качестве примера укажем на ураган "Чарли", который пронесся в США в 2004 г. над штатами Флорида, Кубой и Ямайкой, где погибло 19, 2 и 1 человек соответственно, осталось более 150 тыс. человек без телефонной связи, а ущерб превысил 11 млрд. долларов.

Но случившийся в 2005 году ураган Катрина побил все рекорды: он унес жизни 1833 человека, пострадали 500 тыс. человек, в то время как экономический ущерб составил порядка 125 млрд. долларов. Ураган Катрина достиг г. Новый Орлеан 29 августа 2005 г. при скорости ветра, соответствующей 3-й категории. Сильный шторм образовал более 50 промоин в защитных дамбах, что в дополнение к сильным осадкам привело к мощному наводнению.

Анализ статистики возникновения на американском континенте ураганов показывает, что частота появления ураганов в течение года неоднородна: 92% событий приходится на август-октябрь месяцы с примерно равномерным распределением.

Тайфуны, являясь одним из проявлений тропических циклонов, обладают способностью вызывать локальный подъем уровня океана на несколько метров и, если это происходит у побережья, то возникает волна до 10 м., которая с огромной скоростью заливает низменные побережья. Характерными примерами являются многочисленные тайфуны, возникавшие в 2000 г. над Тайванем, Японией, Южной Кореей и другими регионами земного шара. Так тайфун Billis обрушившись 20 августа со скоростью 360 км/ч на Тайвань разрушил 250 зданий (банки, школы, офисы компаний и жилые дома), нанеся ущерб 48 млн. долларов за несколько часов. В конце августа тайфун Prapiroon бушевал над акваториями Восточно Китайского моря со скоростью ветра от 43 до 181 км/ч. Временно был закрыт международный аэропорт в г. Шанхай. В Мировом океане имеется семь областей зарождения тайфунов, все они расположены вблизи экватора. Основной причиной возникновения тайфуна является прогрев океанской воды на несколько десятков метров выше критического уровня (26.8°C). Спутниковый мониторинг тайфунов позволил установить их маршруты. В основном тайфун после зарождения под влиянием пассатов движется на запад, постепенно поворачивая под действием сил Кариолиса на северо-восток и восток. По такой параболической траектории перемещается до 47% тайфунов. Остальные 53% движутся по другим траекториям, как правило, не очень подчиняющимся строгой закономерности. Но все же достаточно большая группа тайфунов (21%), как правило, проходит почти половину упомянутой параболической траектории, перемещаясь затем с юго-востока на северо-запад. По 7% тайфунов движутся с востока на запад и с юго-запада на северо-восток, а 4% тайфунов перемещаются с юга на север (Байбаков, Мартынов, 1976).

Согласно Голицыну и Васильеву (2001) ежегодно в Мировом океане возникает примерно 80 тропических циклонов, от которых в той или иной степени страдают около 50 стран, а сумма ущерба ежегодно составляет 6-10 млрд. долларов США. Опасность и коварство тропического циклона заключается в том, что даже достигнув побережья, он продолжает двигаться вглубь суши вызывая обильные дожди, часто приводящие к наводнениям. Именно частые разрушительные наводнения, возникающие из-за тайфунов в Приморском крае России, сдерживают социально-экономического развития этого региона.

А от уровня этого развития существенно зависит безопасность населения от природных катастроф.

1.3.3. Торнадо

Одним из коварных и неожиданно возникающих природных образований в атмосфере является смерч (торнадо) (табл. 1.14, 1.15, рис. 1.5, 1.6). Он представляет собой вращающееся воронкообразное облако, которое протягивается от основания грозового облака до поверхности земли. Характерными скоростями ветра в торнадо является 65-120 км./ч, но иногда эта величина достигает 320 км./ч и более. Внешним признаком приближающегося смерча является шум, подобный грохоту движущегося товарного поезда. Возникновение торнадо связывается с сочетанием природных процессов, но еще со времен египетских фараонов известны торнадо искусственного происхождения, которые создавались над вершинами пирамид и знаменовали собой вознесение духа фараона в небо к Богу Солнца «Ра». Сохранившиеся в египетских иероглифах зарисовки торнадо не объясняют технику их образования.

Наиболее характерным регионом, где торнадо возникают довольно часто, является территория США. Хотя смерчи отмечаются по всему земному шару. На территории США за период с 1961 по 2004 гг. от торнадо погибало в среднем 83 человека в год. Чаще всего торнадо возникают в восточных штатах, прилегающих к Мексиканскому заливу, в феврале и марте их частота достигает максимума. На территориях штатов Айовы и Канзаса наибольшая частота возникновения торнадо приходится на май-июнь. Среднее количество торнадо на территории США оценивается величиной около 800 в год, из которых 50% приходится на апрель-июнь. Территориальная неоднородность частоты появления торнадо в США имеет устойчивые характеристики: в штате Техас - 120 торнадо/год, а в северо-восточных и западных штатах - 1 торнадо/год. Например, только за апрель и ноябрь 2002 г. по территории США пронеслось более 100 торнадо, оставив множество разрушений и вызвав более 600 случаев выплат страховок. Не оставляет в покое стихия и другие страны. Табл. 1.14 дает некоторое представление о характере разрушений и уровнях ущерба от торнадо в различных частях света. Видно, что каждый торнадо приносит разрушения и вызывает человеческие жертвы.

1.3.4. Цунами

Одним из наиболее опасных и разрушительных природных катастроф являются цунами, которые представляют собой длинные волны, возникающие в океане в основном при сильных подводных землетрясениях (85%). Среди других причин зарождения цунами являются оползни (7%), извержения вулканов (5%), а также в локальных масштабах высокие волны могут порождаться подводными взрывами, за счет ветра и при падении в океан метеорита или астероида. Скорость распространения цунами в открытом океане хорошо аппроксимируется соотношением \sqrt{gH} , где g - ускорение свободного падения, а H глубина океана (так называемое приближение мелкой воды, когда длина волны существенно больше глубины). При средней глубине 4000 метров скорость распространения волны составляет 720 км/час. В открытом океане высота волны цунами редко превышает один метр, а длина волны достигает 500—1000 километров. Поэтому они не опасны для судоходства. При выходе волн на мелководье, вблизи береговой черты, скорость волны уменьшается, а высота возрастает, иногда достигая нескольких десятков метров. У крутых берегов могут образовываться волны до 30—40 метров высотой. Районы побережья с закрытыми бухтами являются менее опасными. Цунами обычно проявляется как серия волн, т.к. волны длинные, то между приходами волн может проходить более часа. Именно поэтому не стоит возвращаться на берег после ухода очередной волны, а стоит выждать несколько часов.

Системы предупреждения цунами строятся главным образом на обработке оперативных данных сейсмологических станций о землетрясениях, только что произошедших под морским дном. Если землетрясение имеет магнитуду более 7.0 (по шкале Рихтера) и эпицентр расположен под водой, то возникновение цунами становится

весьма вероятным событием. Одной из систем предупреждения цунами является DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis), разработанная в США и основанная в основном на информации, получаемой с буйковых метеорологических станций.

Таблица 0.14. Примеры торнадо и характеристика их последствий.
(Storm Prediction Center, www.spc.noaa.gov)

Дата и место возникновения торнадо	Последствия торнадо
15 мая 1896 г. Штаты Канзас, Техас, Оклахома и Кентукки, США	В этот день возникла серия торнадо, в результате которых в шт. Техас было разрушено 22 дома и погибло 2 человека. Основная активность торнадо проявилась в районе Красной реки, где было повреждено 50 домов и погибло 73 человека, тела некоторых из них было унесены торнадо на расстояния не менее 1 км.
27 мая 1896 г. Штаты Миссури и Иллинойс, США	Серия торнадо за этот день привела к гибели 255 человек, 137 из них погибли в г. Сант-Луис под разрушенными зданиями.
28 октября 1896 г. Штаты Оклахома, Техас и Луизиана, США	Несколько торнадо, возникших в различных районах этих штатов привели к гибели 5 человек и разрушению ряда зданий.
26 апреля 1896 г., Бангладеш	Погибло 1300 человек и разрушено несколько деревень.
11 апреля 1965 г. Штаты Индиана, Оклахома и Мичиган (США)	Серия торнадо сопровождалась обильными дождями с градом. Погибло 271 человек. Экономический ущерб оценен в 1 млрд. 70 млн. долларов.
5 мая 1995 г. Штаты Луизиана, Массачусетс, Оклахома и Техас (США)	Серия торнадо, сопровождавшихся выпадением града и наводнением. Погибли 32 человека. Экономический ущерб составил 7 млрд. 20 млн. долларов.
21 апреля 1996 г. Штат Анканзас, США	Два человека погибли и 50 человек попали в больницы с различными травмами. Разрушено 35 домов и 78 торговых центров. Получили серьезные повреждения 853 здания.
13 мая 1996 г. Бангладеш	Было разрушено более 80 деревень с 10000 построек. Погибло более 700 человек и около 30 тыс. были ранены.
19 июля 1996 г. Болгария	Внезапно возникший торнадо-подобный вихрь на берегу Черного моря поднял в воздух гальку и ударил ей отдыхавшего на пляже мужчину, который мгновенно умер.
6 ноября 1996 г., юго-запад Швеции	Возникший торнадо сорвал крыши с нескольких зданий, перевернул ряд автомобилей и вырвал с корнями множество деревьев.
3 мая 1999 г., шт. Канзас, Оклахома, Техас и Теннеси (США)	Торнадо. Выпал обильный крупный град. Погиб 51 человек. Экономический ущерб составил 2 млрд. 950 млн. долларов.
30 марта 2001 г., провинция Пенджаб (Пакистан)	Мощное торнадо разрушило около 100 зданий, погибло 4 чел.
18 июня 2001 г. Северо-запад штата Висконсин, США	Массивный торнадо охватил полосу шириной около 900 м и со скоростью 170 км/час на расстоянии примерно 60 км произвел разрушения, уничтожив 120 домов и убив 5 человек.
23 июня 2003 г. Штат Небраска, США	Разрушено 11 ферм, погибло 20 единиц крупного рогатого скота, один человек умер от полученных травм.
8 ноября 2005 г., Индиана, США	F3 Более сотни разрушенных зданий, огромный ущерб, погибших -25 человек
28 мая 2008 г., Штат Айова, США	Первый торнадо EF5 в Айове с 13 Июня 1976. 8 жертв и 50 пострадавших



Рис.1.5 Характерное изображение торнадо



Рис. 1.6. Фотография торнадо, сделанная
Фотографом Р. Carsten в штате Техас (США).
<http://science.nationalgeographic.com>

Таблица 0.15. Характеристики торнадо.

Характеристика	Тип торнадо		
	Слабый	Мощный	Неистовый
Доля среди всех торнадо,%	69	29	2
Доля смертельных исходов,%	5	28	67
Время жизни, мин	1-10	≈ 20	≥ 60
Скорость ветра, км/ч	<200	200-380	>380

В историческом аспекте сведения о цунами, как сотрясениях в океане, встречаются во многих литературных источниках с описанием самого события и его последствий. За многие столетия география цунами не изменилась. Поэтому разработка технологий его прогнозирования и слежения основывается на данных мониторинга окружающей среды наиболее вероятных регионов возникновения цунами. Один из обнадеживающих методов предупреждения о цунами основан на использовании системы искусственных спутников Земли для мониторинга рельефа поверхности океана с целью обнаружения и последующего отслеживания опасных волн, распространяющихся по его поверхности.

Трагическая гибель 650 человек во время цунами на индонезийском острове Ява 17 июля 2006 г. и землетрясение и цунами в Индийском океане 26 декабря 2004 г. (погибло 230 тыс. человек) явились толчком к началу работы по созданию комплексной региональной системы предупреждения о цунами и других угрозах в Индийском океане. Помимо обеспечения промежуточного наблюдения за цунами в Индийском океане и ввода в эксплуатацию двух глубоководных буев системы мониторинга цунами (DART) будут модернизированы 11 метеографов, первоначально установленные для сбора данных о климате и способные обнаруживать незначительные колебания уровня моря и передавать данные через спутник в Глобальную телекоммуникационную систему (ГТС) - базовую систему, через которую из одной страны в другую передаются все метеорологические данные, прогнозы и предупреждения.

Для реализации запланированных функций системы DART в рамках проблемно ориентированной программы NOAA в Индийском океане размещено 39 буйковых станций

и ряд донных датчиков температуры и давления (BPR), информация с которых практически в реальном времени (частота регистрации 15 сек.) будет обрабатываться в центрах по контролю за цунами (TWC) и в других в основном входящих в структуру NOAA центрах.

1.3.5. Наводнения

Восстановление истории наводнений в целом по земному шару возможно лишь из фрагментов сохранившихся сведений и упоминаний о них. Не ставя здесь этой глобальной цели, лишь отметим некоторые факты. В частности, сохранились сообщения о наводнениях в Москве. Первое упоминание о разливе Москвы-реки относится к 1496 г., когда после холодной и снежной зимы наступила "великая паводь". После этого наводнения в Москве случались часто, что послужило поводом к созданию в XVIII в. водоотводного канала, обеспечивавшего защиту района теперешних улиц Бахрушина, Новокузнецкой, Пятницкой и Якиманских. В апреле 1908 г. разлив реки Москвы, Яузы и водоотводного канала принял чудовищные размеры, поднявшись на 9 м. и охватив 20% всей территории города. Дома Дорогомиловской набережной и Замоскворечья, стены Кремля были затоплены на высоту до 2,3 м. от уровня мостовой.

В XX столетии наводнения были одним из часто происходивших событий на территории США. Они возникали с высокой неожиданностью и приносили большие экономические потери и человеческие жертвы. Как правило, потоки воды обладали огромной разрушительной силой и уничтожали здания, мосты и другие сооружения. Всего в XX столетии на территории США зарегистрировано 32 весьма разрушительных наводнения. По типам они включали наводнения, возникшие по причине ледового загромождения на реке, вызванного высокой штормовой волной или разрушением плотины, из-за загромождения русла реки обвалами или оползнями. Часть наводнений носила региональный характер. Они в основном возникают в высоких широтах с определенной регулярностью весной при быстром таянии снега или наличии обильных осадков. Поскольку в это время низка инфильтрация из-за замершей почвы, то избыток воды устремляется в реку, уровень которой за считанные часы может подниматься на несколько метров. Такие события постоянно происходят и на территории России, и особенно в Сибири. Примером катастрофического наводнения, унесшего жизни 150 человек, является наводнение в Англии в марте 1936 г. Большие разрушения были причинены наводнением 1993 г. в бассейне реки Миссисипи, ущерб от которых составил 20 млн. долларов. В Чили были отмечены два крупных наводнения, произошедших в 1891 г. и 2000 г., когда за сутки выпадало 17,59 мм и 5,84 мм осадков соответственно. 14 июня 2000 г. вода в г. Сантьяго поднималась на 1 м., что привело к блокированию 14 главных транспортных магистралей страны.

Кратковременные наводнения оказываются возможными при сочетании таких факторов как интенсивные осадки и топография местности с определенным рельефом. Они продолжаются не дольше нескольких часов. Условия для таких наводнений имеются в городах и в горной местности. В городе при обильных осадках ливневые стоки не могут обеспечить быстрый слив воды, а в горной местности, имеющей узкие каньоны, также осадки не успевают стекать. В обоих случаях скопившиеся воды могут устремиться с высокой скоростью по свободному пространству, разрушая здания или вызывая оползни и другие неблагоприятные явления. Так в 1972 г. в г. Рапид (шт. Южная Дакота, США) в результате выпадения в течение 5 часов 37,5 см осадков возникла волна высотой более 9 м, которая устремилась на многие километры от места выпадения осадков и в результате погибло 237 человек.

Наводнения, возникающие в результате преграждения речного стока нагромождениями льда (заторы), очень опасны, так как возникают достаточно быстро в результате переполнения русла реки, и их энергия начинает воздействовать с нарастающей силой на находящиеся в бассейне реки постройки, дамбы, растения, сооружения, мосты, транспортные средства и т.п. Примерами таких наводнений являются разливы рек Уикон

на Аляске весной 1992 г. и р. Лены в мае 2001 г. В последнем случае был затоплен г. Ленск, а уровень воды в реке поднялся на 20,13 м.

К числу весьма неожиданных природных катастроф относятся наводнения, возникающие в результате прихода на сушу высокой волны с моря. В этом случае в зависимости от сочетания скорости ветра и величины сопротивления воздуха движущейся воде могут возникать подъемы воды выше 6 м. Например, в сентябре 1900 г. в шт. Техас (США) такая большая волна возникла при одновременном шторме и урагане, в результате чего погибло 6 тысяч человек.

В прошлом наводнения приносили и приносят сейчас большие беды во многих регионах земного шара. Многие из них были инициированы тайфунами. Так 12 сентября 2000 г. наводнение в Японии, возникшее в результате проливных дождей, последовавших за тайфуном Саомай, парализовало работу автомобильного концерна Toyota, вызвало оползни и привело к гибели пяти человек и эвакуации более 500 тысяч человек. Был затоплен город Нагоя. На острове Хонсю дожди продолжались более двух суток, и практически, было полностью парализовано автомобильное сообщение по основным дорогам центра Японии. Страховые выплаты составили 25 млн. долларов. Достаточно сильное наводнение было инициировано на Тайване в конце октября 2000 г. тайфуном Xangsane, в результате чего погибло 53 человека и были повреждены сельскохозяйственные угодья на площади 48000 га. Ущерб достиг 77 млн. долларов. Циклон Leon-Eline вызвал в период 4-7 февраля 2000 г. обильные дожди на Мадагаскаре, в Южной Африке, Мозамбике и Ботсване, которые закончились небывалым за несколько десятилетий наводнением, оставившим 500 тысяч человек без кровла и причинившим материальный ущерб в 160 млн. долларов. В Южной Корее 22-23 мая 2000 г. в результате выпадения 400 мм осадков возникло мощное наводнение, охватившее территорию выше 27500 км² и приведшее к гибели 10 человек и повреждению более тысячи зданий с ущербом в 27 млн. долларов.

Вообще 2000 г. стал годом мощных наводнений в Европе. Они охватили Италию, Францию, Германию, Австрию, Великобританию, Бельгию и многие территории других стран. О масштабности наводнений можно судить по причиненным разрушениям. Так в Германии в декабре за сутки выпало 50 л. осадков на каждый кв.м площади, что привело к затоплению многих шоссейных дорог и населенных пунктов. В результате пострадали свыше 350 тыс. чел., а нанесенный ущерб превысил 9,1 млрд. евро. В Италии октябрьское наводнение, возникшее из-за проливных дождей, вызвало грязевые оползни и разливы рек, что привело к гибели тринадцати человек, разрушению ряда мостов и нарушению железнодорожного сообщения между рядом индустриальных центров. Всего в 2000 г. было зарегистрировано 18 крупных наводнений, охвативших практически все континенты. Так 11 сентября на японских островах Сяо-Май и Кюсю произошло самое сильное за последние 100 лет наводнение. С 10 октября по 5 ноября наводнения охватили Великобританию, Швейцарию, Италию и Францию с подъемом воды более чем 2 м, что не наблюдалось последние 30 лет. При этом на юге Англии подъем воды достигал 5 м. За трое суток с 9 по 11 октября 2000 г. в Англии выпало 103,4 мм осадков при ураганном ветре 140 км/ч. Это было самое мощное наводнение с 1773 г.

В Австралии 20 ноября одновременно вышли из берегов 12 рек, причинив ущерб в 250 млн. австралийских долларов. Все чаще наводнения случаются на территории России, достигнув показателя 19% от общего числа природных катастрофических явлений. За последние годы ежегодно затапливается не менее 50 тыс. кв. км. С охватом более 300 населенных пунктов. Например, летом 2002 г. на Северном Кавказе (реки Кубань, Терек, Кума, Подкумок и др.) наблюдался аномальный гидрологический режим, вызвавшийся в самом масштабном и разрушительном наводнении, охватившем площадь 345 км² и приведшем к гибели 104 человек. Наводнения регулярно происходят в самом центре Европы в Венгрии. Река Тиса протекает через не очень зажиточные сельскохозяйственные

районы Венгрии. Только за последние годы эти районы подвергались крупным наводнениям в 1993, 1995, 1998, 2000 и 2001 гг.

Для защиты от наводнений строятся дамбы. Их высота и расположение рассчитываются с учетом статистики наводнений на конкретной территории и при обеспечении определенного уровня риска. Одним из характерных примеров, когда учет статистики подъема вод во время наводнений на данной территории оказывается судьбоносным, является ситуация, возникшая в Нидерландах 1 февраля 1953 г. До этого гидротехники спорили какой высоты защитную дамбу соорудить на побережье. Сначала обсуждалась высота 3,9 м, которая никогда ранее не превышалась во время наводнений. Однако, ориентируясь на абсолютный максимум, зарегистрированный в течение 25 лет, и учитывая экономические аспекты, было решено построить дамбу высотой 3,4 м, что соответствовало вероятности достижения этого уровня один раз в 70 лет. Трагедия произошла 1 февраля 1953 г., когда возникшее наводнение преодолело этот уровень и унесло около 2 тыс. жизней, а также вызвало огромные разрушения. Как результат было решено поднять уровень защитной дамбы до 5 м, который возможен лишь один раз в 10 тыс. лет. Но, тем не менее, остается некоторая вероятность того, что уровень подъема воды может оказаться выше дамбы. Инженерные расчеты при строительстве дамбы предусматривают в этом случае защиту самой дамбы от разрушения. Так или иначе, в реальности могут сложиться обстоятельства, когда дамба разрушается, а огромные массы воды устремляются вниз по течению, снося все на своем пути.

1.3.6. Извержения вулканов

Извержения вулканов бывают в основном трех типов: гавайский, плинианский и подледный типы извержения. Общее число действующих вулканов на Земле равно 1350. Из них около 100 являются подвижными. Они вызывают сильные разрушения за счет распространения лавовых потоков и осаждения пепла. Человеческие жертвы от извержений вулканов связаны с множеством причин: лавовые, грязевые и пирокластические потоки, лавины, выпадение тефры и баллистических бомб, болезни и голод. Масштаб бедствия в зоне извержения вулкана зависит от инфраструктуры и заселенности территории, прилегающей к вулкану. Например, за период с 1900 по 1986 гг. во время катастрофических извержений на планете 85,8% (65,2 тыс. чел.) из числа жертв (76 тыс. чел.) погибло от пирокластических потоков и лавин и от грязевых потоков и паводков. Современные средства космического мониторинга позволяют заранее рассчитать пути движения этих потоков и тем самым перспективно определить места безопасных поселений в зоне влияния конкретного вулкана.

Несмотря на высокий уровень опасности в зонах вулканической активности с исторических времен располагались поселки и города, так как на вулканических породах образуются плодородные земли. С течением времени, осознавая свое бессилие перед вулканическими явлениями, человек пытается найти способы противостоять этой грозной стихии. За прошедшее столетие удалось объяснить многие элементы вулканической активности и описать особенности строения земной коры. Многие сведения об образовании магматических очагов в земной коре и мантии позволили сформулировать законы, которым подчинена вулканическая активность, и найти внешние признаки приближения момента извержения вулкана. Эти закономерности зависят от типа вулкана, его размеров и многих других параметров.

Самым высоким вулканом является вулкан Мауна-Лоа на Гавайях. Самый большой кратер диаметром почти 9 км действующего вулкана находится на Аляске. Одним из активных является вулкан Mayon на Филиппинах в 350 км. Юго-восточнее Манилы. Он извергается каждые 10 лет. Извержение в 1814 г. привело к гибели 1200 человек. Во время извержения в 1993 г. погибло более 70 человек.

Даже сейчас, когда геофизика и вулканология располагают мощными теоретическими и техническими возможностями, задача надежного прогнозирования извержений вулканов и землетрясений не решена. Это в первую очередь связано с

наличием нескольких гипотез образования вулканических очагов. Одна из них связана с охлаждением огненно-жидкого ядра Земли. Другая гипотеза связывает вулканическую активность с процессами сжатия и разогревания при распаде радиоактивных элементов на больших глубинах. Существуют и другие гипотезы, которые пытаются связать геофизические и климатические процессы и объяснить неравномерность поверхностного распределения очагов вулканической активности. Например, почему на Камчатке в пределах небольшой территории сосредоточено более десяти вулканов и почему некоторые из них действуют, а другие не проявляют активности? Все возникающие при этом вопросы решаются геологией, которая установила определенную хронологию эпохальных изменений в облике земной поверхности и, по-видимому, именно в познании закономерностей движения континентов лежит ответ на многие из упомянутых проблем вулканологии. Действительно, за долгую геологическую историю материки то объединялись, то распадались. Установлено, что примерно 2,5 млрд. лет назад было двадцать континентов, а в раннем протерозое (2 млрд. лет) их было всего тринадцать. Предполагается, что через 1,5 млрд. лет Австралийский, Американский, Африканский и Евразийский континенты вновь соединятся с Антарктидой в единый суперконтинент. При этом, безусловно, будут изменяться мощные вулканические пояса, проходящие по окраинам континентов.

Вулканическая активность является неотъемлемой составляющей жизни нашей планеты. Вулканы не только представляют опасность для населения прилегающих территорий, но они делают землю плодородной, дают тепло и хранят богатейшие запасы драгоценных металлов и минералов (табл. 1.16).

В частности, вулканы хранят большие запасы золота, которое, например, было обнаружено на Камчатке. Скопления тонко рассеянного золота в вулканических породах могут достигать нескольких килограммов на тонну руды, но его извлечение требует применения других технологий, чем при добыче золота из традиционных месторождений. Вулканические породы по составу делятся на четыре базовых группы, принадлежность к которым определяется по содержанию диоксида кремния.

Таблица 0.26. Средний химический состав вулканической лавы (в весовых процентах).

Оксиды	Нефелино-вый базальт	Базальт	Анdezит	Дацит	Фонолит	Трахит	Риолит
SiO ₂	37,6	48,5	54,1	63,6	56,9	60,2	73,1
Al ₂ O ₃	10,8	14,3	17,2	16,7	20,2	17,8	12,0
Fe ₂ O ₃	5,7	3,1	3,5	2,2	2,3	2,6	2,1
FeO	8,3	8,5	5,5	3,0	1,8	1,8	1,6
MgO	13,1	8,8	4,4	2,1	0,6	1,3	0,2
CaO	13,4	10,4	7,9	5,5	1,9	2,9	0,8
Na ₂ O	3,8	2,3	3,7	4,0	8,7	5,4	4,3
K ₂ O	1,0	0,8	1,1	1,4	5,4	6,5	4,8
H ₂ O	1,5	0,7	0,9	0,6	1,0	0,5	0,6
TiO ₂	2,8	2,1	1,3	0,6	0,6	0,6	0,3
P ₂ O ₅	1,0	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1
MnO	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1

1.3.7. Сели, лавины, оползни, обвалы

К опасным природным явлениям в горной местности относятся склоновые перемещения горных пород, к которым принадлежат обвалы, сели, лавины, осьпи и оползни. Наиболее распространены оползни и селевые потоки. Так за период с 1945 г. по 2004 г. в мире произошло 43 крупных перемещений земли с числом жертв в каждом случае свыше 50 человек.

Оползень - это смещение грунтовых масс под действием силы тяжести по увлажненной поверхности скального грунта. Под обвалом понимается обрушение горных

пород со скальных и относительно сухих рыхлых крутых склонов. Эти явления возникают при внезапном движении земли в районах с крутыми склонами и, как правило, при наличии значительных осадков. Драматическая ситуация возникает, если оползень или обвал происходит вблизи населенного пункта. Так в 1903 г. в Канаде в местечке Франг обрушилась вершина горы Терпл, низвергнув на горняцкий поселок более 30 млн. м³ горной породы. Погибло 70 человек и была засыпана Трансканадская железная дорога. В 1959 г. оползень, вызванный землетрясением в Монтане, привел к образованию нового озера Эфквейк. Погибло 28 человек. Наводнение в юго-западном Китае в июле 2004 г. вызвало сильные селевые потоки и оползни, обрушившиеся на деревни провинции Юньнань и приведшие к гибели 11 человек и затоплению более двух тысяч крестьянских домов.

В горных регионах часто случается такое очень опасное и коварное природное явление как сель, представляющий собой внезапный горный поток с высоким содержанием твердых материалов. Сели возникают во время ливневых дождей, при интенсивном таянии снега, а также при прорыве плотин водохранилищ или естественных перемычек, отделяющих водоем от ближайшего ущелья. К наиболее важным факторам развития селевого потока относятся геологическое строение, рельеф, степень и характер увлажнения, состояние почвенно-растительного покрова, морфология долин в нижнем ярусе горного участка и климатические условия. Знаменитая долина Гейзеров на Камчатке была уничтожена гигантским селевым оползнем. 20 сентября 2002 года в Кармадонском ущелье Северной Осетии во время схода ледника Колка пропали без вести 105 человек. За несколько минут ледник обрушил в Кармадонскую котловину миллионы тонн льда и камней.

К числу опасных природных явлений относятся также снежные лавины, возникающие в горной местности в результате обильных снегопадов и за счет длительного накопления снега на крутых склонах. Снежные лавины начинают образовываться на склонах крутизной не менее 25° и при снежном покрове не менее 30 см. Механизм образования снежных лавин состоит в изменении сил внутреннего сцепления и силы тяжести снежного покрова. Критическая высота снежного покрова h , при которой происходит его обрушение, является функцией внутреннего сцепления g , объемной массы снега v , коэффициента внутреннего трения в снеге β и угла наклона α (Гарагули, Ершов, 2000): $h=g^{-1}\{v\cos\alpha[\sin\alpha-\beta\cos\alpha]\}$.

Лавинно-опасные районы известны. Например, на территории России к ним относятся значительные области Кавказа, Урала, Камчатки, Северо-Востока, Алтая, Саян и обширные пространства к востоку от р. Енисей. Степень изученности этих территорий не одинакова. Одним из наиболее исследованных лавиноопасных районов являются горы Бырранга и Пutorана.

Горы Бырранга занимают северную часть полуострова Таймыр с максимальной высотой 1146 м (гора Ледниковая). В историческом прошлом этот район дважды подвергался воздействию Таймырского ледника, который с северной части полуострова двигался в Западно-Сибирскую низменность. В результате в четвертичное время северная часть полуострова Таймыр опустилась ниже уровня моря, а южная часть полуострова испытала поднятие вдоль края Енисейско-Хатангской впадины. Второе оледенение принесло в горы Бырранга изменение структуры рельефа, обеспечив появление высоких террас и глубоких речных долин с уклонами 20-25° и более.

Для гор Бырранга характерными климатическими параметрами являются средняя температура января -32– -34°C с продолжительностью зимы около 10 месяцев и годовой суммой осадков 400-500 мм (из них около половины выпадает в твердом виде). В результате продолжительность залегания устойчивого снежного покрова составляет около 270 суток со средней толщиной 70-90 см. В зонах ветровой тени толщина снежного покрова может превышать 2 м. Поскольку лесная растительность отсутствует, а мохово-травяные тундры поднимаются лишь до 200-250 м, то снежные наносы на склонах гор

удерживаются лишь благодаря сильным морозам и вероятность образования лавины мала вплоть до конца мая-начала июня, когда после длительной полярной ночи интенсивность солнечной радиации начинает возрастать, достигая в апреле уровня $9 \text{ ккал}/\text{см}^2/\text{мес}$. С этого времени вероятность снежных лавин повышается. На рис. 1.23 и 1.24 приведены оценки, характеризующие уровни лавинной опасности в горах Бырранга и Пutorана.

Горы Пutorана занимают северо-западную часть Средне-Сибирского плоскогорья, вытянутую от оз. Пясино до оз. Ессей и рек Котуя и Мойерос с их притоками. Максимальная высота составляет 1664 м, а глубина ущелий колеблется от 200 до 1000 м. Крутые склоны не менее 35° без растительности являются источниками снежных лавин. Ведь годовая сумма осадков в зависимости от высоты колеблется от 400-600 мм до 1200-1600 мм, что способствует накоплению больших массивов снега. Также как и в горах Бырранга в зимние месяцы идет накопление снега местами до 120 см с плотностью 350-400 $\text{кг}/\text{м}^3$. Но в отличие от гор Бырранга горы Пutorана имеют более сложный растительный покров. Подножия и нижние части склонов гор заняты елово-лиственными и лиственными лесами. Верхняя граница леса и редколесий достигает на северо-западе 250 м, а на юго-востоке 800 м. Выше размещается горная тундра, которая на высоте 1200 м переходит в горную пустыню. Все это с одной стороны способствует формированию сложной пространственной структуры больших запасов снега, но с другой, достаточно четко определяет лавиноопасные зоны. Объемы лавин колеблются от 10 до 100000 м^3 . Они, как правило, начинаются в высотной зоне 300-500 м, где сдерживающие факторы со стороны растительности невелики.

Наиболее изученным в отношении лавинной опасности является район Хибинских гор, расположенных в центре Кольского полуострова и составляющих часть массива, простирающегося узкой полосой (30-50 км) с запада на восток почти на 500 км от возвышенности Манселька (Финляндия) до гряды Кейв. Наиболее высокие массивы размещаются в центре этой полосы: Мончегорская (1114 м), Ловозерские Тундры (1126 м) и Хибины (1191 м).

Большая часть территории Хибин характеризуется значительной лавинной опасностью. В связи с этим в середине 30-х годов XX столетия была создана противолавинная служба, которая обеспечивала защиту производственного объединения "Апатит" от снежных лавин. Большинство лавин сходит со склонов крутизной $20-45^\circ$. Распределение лавин во времени колеблется от 0 до 124 лавин в год для одного очага с максимумами в январе-феврале и апреле. За период 1936-1982 гг. ежегодно регистрировалось около 200 лавин объемом от 50 м^3 до 1125000 м^3 . В настоящее время противолавинная защита поставлена на промышленную основу, в результате чего принимаются превентивные меры по активному воздействию на процессы лавинообразования.

Следующим районом территории России с высокой лавинной опасностью является Алтай, характеризующийся сочетанием высоких хребтов (более 4000 м) и глубоких долин. Свыше половины площади Алтая занимает лесной пояс, простирающийся до высот 350-400 м на западе и до 1600-1800 м на юго-востоке. В отдельных местах леса встречаются на высотах 1800-2400 м. Безусловно, леса в сочетании с рельефом играют существенную роль в формировании картины лавинной опасности. Но главным лавинообразующим фактором является климат, который на Алтае имеет четко выраженный вертикальный поясной характер. Среди климатических элементов, значительно влияющих на активность и режим лавинообразования, следует выделить циркуляционные процессы и термический режим. Основную массу снега приносят западные и юго-западные циклоны, как правило, сопровождающиеся существенным повышением температуры и интенсивными снегопадами. В результате возникают условия схода лавин. Так, в заснеженные зимы 1965/66 и 1968/69 гг. на западной периферии Алтая наблюдались массовые сходы катастрофических лавин.

В целом структура лавинной опасности на Алтае формируется за счет сочетания температурного и ветрового режимов. Из-за протяженности территории и неоднородности рельефа эти режимы имеют пространственные распределения. Так, средняя январская температура атмосферы на Западном Алтае колеблется в диапазоне -13,0°C — -27,0°C, в тоже время средняя годовая температура в предгорьях Западного Алтая составляет 1-3°C. Для Южного Алтая средняя годовая температура изменяется от 5°C до 10°C. В целом, по всей территории Алтая в январе могут наблюдаться температуры до -57,5°C. Ветровые условия имеют вертикально выраженный характер: у поверхности земли преобладают юго-западные ветры, а на больших высотах - южные. Столъ же неоднородно распределение твердых осадков: в межгорных впадинах годовая сумма твердых осадков достигает 200 мм, а в горной части Западного Алтая превышает 1000 мм. При этом доля твердых осадков убывает от окраины вглубь горной области и от вершин к подножью. Критический уровень интенсивности снегопада для образования лавин изменяется в интервале 5-10 мм/сут. в зависимости от состояния снежного покрова.

Значительная лавинная активность характерна для расположенного на южной окраине Сибири горного массива Саян, простирающегося от истоков рек Енисея и Абакана до рек Ангары и Казыра. Саяны делятся на Западный Саян (2500-2700 м) и Восточный Саян (2700-3400 м). Очики лавинообразования большей частью сосредоточены на наветренных северо-западных и западных склонах Саянского хребта, где средняя температура воздуха составляет около -3,8°C. Из-за сильной неоднородности территориального распределения осадков снежный покров формируется неравномерно и достигает в различных местах 1,0-2,5 м, что определяет пространственную пестроту лавинной опасности. В сочетании с высотным распределением растительных покровов продолжительность лавиноопасного периода определяется появлением первых лавин уже в октябре, а последних в июне. В Западном Саяне лавины чаще всего сходят в ноябре, а в Восточном Саяне - с января по апрель. Пик лавинной опасности приходится на март-май, когда наступает период весеннего увеличения осадков и температуры. Наиболее мощные лавины объемом до 100000 м³ наблюдаются в бассейне р. Казыр. А в альпийском и субальпийском ландшафтных поясах возможны лавины объемом 150-500 тыс. м³ (Трошко, 1992).

На карте лавиноопасных регионов России отмечены территории, относящиеся к Уральскому хребту, простирающемуся довольно узкой (150 км) цепью невысоких параллельных горных образований более чем на 2 тыс. км от 48° до 68°30' с.ш. Глубоко расчлененный рельеф при повышенном выпадении снега в течение длительной зимы создает благоприятные условия для схода лавин. Этому также благоприятствуют высокая повторяемость метелевых процессов (140-160 суток) и частые западные ветры со скоростями от 8-12 м/с до 40 м/с. Объемы лавин колеблются от 10 до 2000 м³ в зависимости от времени года и широты.

Наиболее актуальным лавиноопасным регионом является Большой Кавказ, где в зимний период неоднократно регистрировались трагические эпизоды, когда в снежных лавинах гибли люди. Массовый сход лавин регистрировался в 1846/47, 1854/55, 1899/90, 1931/32, 1955/56, 1986/97 и 1992/93 гг. В эти годы были многочисленные жертвы среди населения, разрушались строения, уничтожались большие участки леса, погибал скот и блокировались дороги. Например, 27 января 1993 г. на Транскавказской автомагистрали в снежной лавине погибло 17 человек. Также как и в других регионах условия формирования снежных лавин на склонах Большого Кавказа определяются наклоном горных хребтов, наличием на них растительности и климатическими условиями. Северный склон Большого Кавказа покрыт лесом до высот 1200-1500 м на востоке и до 2000-2300 м на западе. Зимний период длится 78 и 25 суток на северном и южном склонах соответственно. Температура воздуха с высотой понижается в среднем на 0.6°C на каждые 100 м подъема, что определяет продолжительность зимы на разных высотах.

Несмотря на то, что режимы образования снежных лавин на Большом Кавказе хорошо изучены и определены наиболее опасные районы, все же сам процесс образования и схода лавин остается трудно параметризуемым и прогнозируемым. Распределение лавин по высоте в среднем определяется такими показателями: 2.2% приходится на пояс ниже 1 км, на высокий пояс 1,0-1,5 км приходится 10.3% лавин, далее с высотой лавины распределены соответственно – 1,5-2,0 км – 13,9%, 2,0-2,5 км – 19,5%, 2,5-3,0 – 31,5% и выше 3 км – 22,6%. Большинство лавин сходит в декабре-феврале. По типу лавины делятся на лавины во время снегопадов (75%), при весеннем снеготаянии (8%), при оттепелях (6%), при метелях (2%) и при температурном разрыхлении снега (9%). Средний объем лавин оценивается величиной 50 тыс. м³ (Залиханов, 1981; Погорелов, 1998).

Снежные лавины являются неотъемлемой частью процессов, происходящих в горной местности. Число жертв и материальные убытки от них зависят от многих факторов. Как отмечает Рэмсли (1978), например, в Норвегии, начиная с 1836 г. в среднем за год под снежными лавинами погибает 12 человек. В Швейцарии гибнет 25 человек в год. В частности, среди наиболее критических лет для Норвегии были 1679, 1755, 1881, 1886, 1906 и 1919 гг., когда число погибших было 450, 200, 60, 161, 29 и 31 человек соответственно. Уровень потерь человеческих жизней сохраняется до сих пор. Так лавина, сошедшая 6 августа 2004 г. в горах Тянь-Шаня на территории Киргизии унесла жизни 12 человек. Из-за снежных лавин 12 февраля 2004 г. в Пакистане (Кашмир) погибло более 30 человек.

1.3.8. Жара, засуха

Засуха относится к экстремальному взаимодействию человека и природы. В условиях, когда осадков выпадает меньше обычного количества, растения начинают испытывать дефицит воды и при длительном воздействии этого лимитирующего фактора погибают. Упоминания о засухе восходят к библейской истории. Всегда длительная засуха приносила большие страдания человеку, так как при этом истощались пищевые ресурсы. В более близкие периоды времени засухи регистрируются во многих регионах земного шара. Например, в конце 1960-х - начале 1970-х годов засуха в Сахеле на южной окраине пустыни Сахары привела к гибели около 100 тыс. человек. В частности, 1970 и 1971 гг. для восточной Кении характеризовались снижением количества осадков от их обычной нормы до 50%, что привело к гибели сельскохозяйственных посевов, падежу скота и голоду. Серьезные засухи в Кении регистрировались в 1836, 1850, 1861, 1880, 1899-1901, 1913-1918, 1925, 1936, 1954 и 1961 гг. В общем, для многих стран Африки засуха является национальной проблемой. Так, например, Танзания в среднем из-за засух теряет около 10% первичной продукции в год.

Другим регионом Земного шара, который регулярно подвергается засухе, является Австралия. Здесь сильные засухи отмечены в 1864-66 гг., 1972-73 гг. и 1991-95 гг. Засушливые годы 1911-16 вызвали потери 19 млн. овец и 2 млн. голов крупного рогатого скота, а засуха 1963-68 гг. привела к потере урожаев до 40%. Особенно от засухи страдают центральные регионы страны.

В период длительного сохранения высоких температур высыхают русла рек и погибают многие растения. В общем, засуха определяется как экстремальное отклонение количества осадков от среднестатистического уровня, характерного для данной территории. Принято различать три типа засух: метеорологическая, гидрологическая и сельскохозяйственная. Метеорологической засухой называют ситуацию, когда наблюдается сильное временное запаздывание осадков, в результате чего на территории возникает дефицит влаги. К гидрологическому типу засух относят наличие дефицита запасов воды в поверхностных слоях почвы и снижение уровня грунтовых вод из-за снижения уровня воды в реках, озерах и других водоемах. Сельскохозяйственный тип засухи появляется при снижении влажности почвы ниже критического уровня, когда возникает лимитирование роста растений. Ясно, что эти типы засух тесно связаны, так как являются функциями характеристик регионального гидрологического процесса.

Периоды засух тесно переплетаются с лесными пожарами. В последнее десятилетие эти два природных феномена возникают все с большей частотой в различных регионах земного шара, многие из которых не принадлежат к зонам с засушливым климатом. Так, например, 2002 г. стал годом сильнейшей засухи на востоке США, которая с апреля по июль охватила около 40% территории США, а в это же время в канадской провинции Квебек было зарегистрировано 45 лесных пожаров. В 2002 г. засухой были охвачены центральные регионы России, что вызвало на европейской части многочисленные пожары, дым от которых ощущался в более чем 100 населенных пунктах, в том числе и в Москве. В 2002 г. засуха охватила многие африканские страны (Зимбабве, Малави, Замбия, Мозамбик, Кения, Лесото, Свазиленд и Эфиопия), в результате чего в этих странах разразился голод. В тоже время на востоке Африки были отмечены наводнения. Такая региональная неравномерность и неустойчивость климатических ситуаций становится характерной для современной окружающей среды. Действительно, например, в 2002 г. на западе Индии в августе сильная засуха, а на востоке страны наводнения. В Китае в апреле происходит самая серьезная за последние 40 лет песчаная буря, а в июле начинаются сильные наводнения с человеческими жертвами.

1.3.9. Лесные пожары

Лесные пожары возникают по естественным и антропогенным причинам. 300 млн. лет назад, когда появились первые лесные массивы на земле, антропогенный фактор отсутствовал, а сами леса были сильно увлажненными. Заболоченные заросли папоротников, хвои и плаунов не могли гореть. Однако с течением времени изменение климата привело к ситуациям, когда огонь в лесу стал обыденным событием. Известно, что соотношение ударов молний над сушей и океанами составляет 100:1, что приводит к частым загораниям леса. В среднем плотность ударов молний, например, в тропических лесах и лесах умеренной зоны составляет соответственно 50 и 5 ударов на квадратный километр. Вероятность загорания леса сильно зависит от увлажненности территории. По имеющимся оценкам от ударов молний на земном шаре ежегодно возникает более 20 тыс. лесных пожаров. Их география определяется климатом, а распространение и масштабность являются функциями многочисленных факторов окружающей среды (влажность почвы, температура, плотность и тип деревьев, рельеф и т.п.). В историческом аспекте лесные пожары играли роль регулятора направленности эволюции земных покровов и населяющих их видов животных. Вмешательство человека привело к резкому изменению сложившихся веками законов естественной эволюции и изменило роль лесных пожаров.

Как следует из сохранившихся летописных сведений, вспышки интенсивностей пожаров в прошлом приходились на периоды засух. Например, Сузdalская летопись сообщает, что в 1223 и 1298 гг. на территории России бушевали сильные лесные и торфяные пожары. Никоновская и Новгородская летописи упоминают о засухах и лесных пожарах в XIV-XVII веках, сопровождавшихся голодом среди населения и большими потерями среди диких животных. О засухах XVIII и XIX веков сведения можно найти во многих исторических документах, в сохранившихся переписках известных людей и периодических журналах того времени. Как отмечают Софонов и Вакуров (1981) количество упомянутых в русских летописях засух и лесных пожаров не превышает 50 случаев. В прошлом и начале этого века статистика лесных пожаров приобрела регулярный характер, а сама проблема получила научное развитие.

В настоящее время создаются математические модели распространения лесных пожаров, развиваются дистанционные технологии обнаружения и контроля лесных пожаров, исследуются условия загорания лесных материалов и предлагаются технологии локализации очагов загорания. В частности, установлена двусторонняя связь лесных пожаров с состоянием озонового слоя, так как основные составляющие пожарной опасности, как температура и влажность горючих материалов в лесу, в значительной мере определяются концентрацией стратосферного озона.

Начало XXI века отмечено обширными лесными пожарами на территории России, Европы, Америки и Юго-Восточной Азии. Так летом 2004 г. на территории России зарегистрировано 197 очагов загорания леса по различным причинам. Лесные пожары отмечены в Красноярском крае, республиках Коми и Саха, Архангельской, Владимирской, Иркутской, Кировской, Свердловской и Читинской областях, на Дальнем Востоке. О масштабности этих лесных пожаров можно судить по данным об их количестве: Архангельская область - 12 очагов загорания, Якутия и Коми - 22 и 20 лесных пожаров соответственно. Наибольшее число лесных пожаров на территории России было на Дальнем Востоке (47 очагов).

Природный пожар представляет собой опасное стихийное бедствие, так как он уничтожает большие материальные ценности, в нем гибнут животные и птицы, а также в зависимости от зоны горения огонь может распространяться на населенные пункты, промышленные предприятия и выводить из строя высоковольтные линии электропередачи. Помимо этого лесной пожар задымляет большие пространства, изменяя состояние атмосферного воздуха. Крупные лесные пожары сокращают стоки атмосферного CO₂, что приводит к возрастанию парникового эффекта. Такие пожары часто возникали на территории России. Так, в 1915 г. в Западной Сибири лесные пожары охватили площадь около 14 млн. га. В среднем на территории России ежегодно возникает 10-30 тыс. очагов горения леса с общей площадью 0.5-2.0 млн. га. Крупные лесные пожары были в 1972, 1984 и 2002 гг. Например, в июле 2002 г. лесной пожар вплотную (2км) подступил к заводу по производству сжиженного газа под Якутском и газоперерабатывающий завод находился под угрозой полного уничтожения.

1.4. Роль антропогенных факторов в динамике природных катастроф

В древние времена человек, оставаясь наедине с грозными силами природы, полностью зависел от них и согласно дошедших до нас легенд и сказаний постоянно боролся за свое существование и даже выживание. Но в процессе развития цивилизации человек постепенно стал менее зависеть от природных процессов и даже начал ими управлять. В современную эпоху человечество, понимая свою неразрывность с природой, начало осознавать, что именно техносфера становится основным источником опасности для всего сущего на нашей планете. Действительно, происходящие по вине человека техногенные аварии и катастрофы вызывают изменения параметров окружающей среды вплоть до глобальных масштабов, что ведет к нарастанию противоречия между человеком и природой. Достаточно очередной раз обратиться к проблеме высыхания Аральского моря, чтобы понять необратимость создаваемых человечеством изменений природной среды.

Среди наиболее значимых антропогенных факторов воздействия на окружающую природную среду можно назвать объекты энергетики, газо-, нефте-, аммиако- и продуктопроводы, транспорт, гидротехнические сооружения, объекты коммунального хозяйства, объекты химической и тяжелой промышленности и др..

Одной из актуальных проблем охраны окружающей среды на территории России, например, является сжигание попутного нефтяного газа, за счет чего объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу составляет по различным источникам 322-400 тыс. тонн в год. Этот объем загрязнителей занимает 12-15% всего годового объема выбросов загрязнителей атмосферы в России. По оценкам Всемирного банка, полученным с помощью космических средств, лидерами по сжиганию попутного нефтяного газа являются Россия и Нигерия, где сжигается в год 50,7 и 23,0 млрд. м³ газа соответственно. Всего в мире ежегодно сжигается 150-170 млрд. м³ попутного газа (Данилов-Данильян, Лосев, 2000).

Попутный газ при разработке нефтяных месторождений, являясь побочным продуктом для большинства российских предприятий нефтедобычи, может быть утилизирован на предприятиях по производству различных химических веществ. Доходы

от такой переработки могли бы составить 362 млрд. рублей в год, а пока Россия терпит убытки от сжигания попутного газа в размере 140 млрд. руб. ежегодно.

Отсутствие эффективной технологии контроля сжигания попутного нефтяного газа является одной из важных причин сдерживания инвестиций в создание производственных процессов его переработки. Предложенная в работе Бондура и др. (2009) технология геоинформационного мониторинга, предусматривающая прогнозирование контролируемых процессов с последующей корректировкой режима мониторинга. Это может служить объективной основой для создания надежной и экономически эффективной процедурой контроля обширных на территории Сибири газоконденсатных месторождений.

Человек уничтожает леса и увеличивает площади пахотных земель, за счет чего в атмосферу с каждым годом попадает все нарастающий поток аэрозолей. Эти аэрозоли переносятся на большие расстояния вплоть до заснеженных акваторий Арктики, альbedo которых существенно влияет на глобальный климат. И хотя до сих пор радиационное воздействие аэрозоля оценивается с большой погрешностью и имеет большую неопределенность, Тем не менее, наиболее достоверное значение суммарного РВВ за счет аэрозоля составляет $-0,4 \pm 0,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Антропогенно обусловленные изменения РВВ за счет облаков, вероятно, значительно, чем связанные с аэрозолем, но еще более неопределены. Подобные изменения (включая влияние самолетных инверсионных следов) представляет собой главным образом результат косвенного воздействия антропогенного аэрозоля, вызывающего (функционируя как ядра конденсации) вариации микроструктуры и оптических свойств облаков. Грубые оценки дают "облачное" РВВ от -1 до $-1,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$, но оно может изменяться на порядок величины (в зависимости от задания входных параметров). Условно можно принять значение, равное $-1,1^{+0,5} \text{ Вт}/\text{м}^2$. По-видимому, некоторый рост количества облаков, наблюдавшийся в 20 веке, можно приписать косвенному воздействию аэрозоля. Уточнение полученных оценок требует осуществления комплексных наблюдательных программ в различных регионах земного шара.

Вклад изменений землепользования в вариации РВВ связан с процессами обезлесивания, опустынивания и сжигания биомассы, влияющими на альbedo и шероховатость подстилающей поверхности, а также эвапотранспирацию. Важно также, что альbedo поверхности, лишенной растительности, сильнее изменяется при установлении снежного покрова, чем при наличии растительности. Приближенные оценки изменения радиационного баланса Земли, обусловленного эволюцией землепользования, дали значения порядка $-0,2 \pm 0,2 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (Данилов-Данильян, Лосев, 2000; Бондур и др., 2009).

Города являются одним из наиболее существенных и зримых феноменов развития современной цивилизации. Несмотря на ярко выраженную противоречивость их развития, для большинства населения планеты они являются символом прогресса. И все же «города не достойны своей эпохи, они уже не достойны нас». Это мнение выдающегося французского архитектора и градостроителя Ле Корбюзье (1977), которое было высказано им еще в 1925 г., во многом справедливо и в наше время. Одна из главных причин подобной оценки – неблагоприятная экологическая обстановка, а другая – непрерывный рост населения городов. Уже в течение предстоящих 20 лет в развивающихся странах более половины населения будет проживать в городах. Именно это обстоятельство так же, как и проблемы больших городов, привлекает большое внимание многих исследователей.

Главная особенность на стыке ХХ-ХХІ вв. - динамический, не останавливающийся рост мегаполисов. Если в 1970 г. в них проживало 35% населения планеты, то в 2000 г. - уже почти 50%. В 2003 г. в городах проживало около 3.3 млрд. человек. При этом преобладающий вклад (90%) вносят города развивающихся государств (Григорьев, Кондратьев, 2004а,б).

Прогнозы развития урбанизации на ближайшие 30 лет показывают, что с точки зрения размещения населения будущее принадлежит городам. В 2030 г. число горожан во всем мире может достигнуть 60% от общего населения планеты.

Огромный прогресс во многих сферах жизнедеятельности, который связывается с ростом городов, одновременно сопровождается крупными негативными последствиями. Они весьма многоаспектны и связаны, в частности, с бедностью многих горожан, низким уровнем здоровья, высокой смертностью, деградацией окружающей среды, недостатками в инфраструктуре и развитии городских служб. Важнейшей из этих проблем является экологическая обстановка и готовность инфраструктуры защитить население от природного бедствия. Ведь именно это является первопричиной целого ряда других негативных сторон городской жизни (прежде всего здоровья горожан, а также бедности). Это в определенной степени может служить тормозом для прогрессивного положительного развития городов.

Конечно, особенности урбанизации в регионах разных континентов резко отличаются. Наиболее высокий уровень урбанизации отмечается в государствах Северной Америки (77,2%), Латинской Америки (75,3%) и Европы (74,8%). В остальных регионах эти показатели характеризуются следующими уровнями: Океания и Австралия – 70,2%, Азия – 36,7% и Африка - 37,9% (WI, 2007, 2009). Такая статистика вполне закономерна и отражает различие стран по уровню промышленного развития.

На уровне отдельных государств феномен урбанизации проявляется в следующих показателях: Бельгия – 97,3%, Исландия – 92,5%, Уругвай – 91,3%, Великобритания – 89,5%, Нидерланды – 89,4%, Германия – 87,5%, Венесуэла – 86,6%, Аргентина – 85,9%, Чили – 85,7%, Дания – 85,3% и Швеция – 83,3%, Бразилия – 81,3% (WI, 2007, 2009). Анализ этих и других показателей урбанизации показывает, что имеет место зависимость концентрации населения от частоты неблагоприятных и опасных природных явления на данной территории. В частности, в Исландии на расселение оказывает влияние вулканическая активность, а в Нидерландах - морские затопления низменной части страны. В Чили обширные территории заняты пустынями и горами, в Уругвае широко распространены наводнения, в Бразилии и Венесуэле значительные площади покрыты тропическими лесами. Очевидно, и в других регионах природные бедствия оказывают влияние на расселение населения. Однако эта зависимость пока остается слабо изученной.

В Северной Америке, несмотря на общий высокий уровень сосредоточения населения в городах, в двух крупнейших государствах континента - США и Канаде - в 2000 г. уровень урбанизации не достиг 80% (77,2 и 77,1%, соответственно. К 2015 г. только в США уровень урбанизации перейдет указанный порог и достигнет 81%. Это объясняется по крайней мере двумя причинами. Одна из них - наличие в этих странах обширных равнинных пространств, в пределах которых существует много безопасных (в природном отношении) и удобных для поселения мест. Несомненно, сдерживающим фактором роста больших городов является также высокий уровень жизни в обоих государствах как в городах (больших и малых), так и в сельской местности.

Наименее урбанизированы в настоящее время страны Африки. В 2000 г. только в четырех из них уровень урбанизации превысил 80%-ый рубеж. Это Ливия (87,6%), Габон (81,4%), Джибути (83,3%) и Западная Сахара (95,4%). Невысокий уровень городского населения сохранится здесь и к 2015 г., не превышая в большинстве стран порога 50%.

В Азии в 2000 г. среди 50 государств порог городского населения в 80% был превышен только в 11. Из крупных стран в этом списке значится только Республика Корея (81,9%). В самых же густо населенных государствах уровень урбанизации составляет: Китай (32,1%), Индия (28,4%), Индонезия (40,9%), Пакистан (37,0%). Довольно высокий уровень урбанизации достигнут в Японии (78,8%), что несомненно объясняется влиянием неблагоприятных природных факторов, таких как цунами, вулканические извержения, землетрясения и тайфуны.

Одной из особенностей современной урбанизации является возникновение городов и городских агломераций-миллионеров. Всего в мире крупнейших мегаполисов насчитывается более 100. В Северной Америке к 2007 г. таковых было 43, в том числе 39 в США и 5 в Канаде. Среди них: Нью-Йорк (21,75 млн.), Лос-Анжелес (13140 тыс.), Торонто

(5,1 млн.) и Чикаго (9,5 млн.). Среди Европейских государств первенствуют такие мегаполисы, как Москва (15,35 млн.), Париж (11,2 млн.), Стамбул (10,9 млн.) и Лондон (13,9 млн.). В других регионах земного шара следует указать на такие крупнейшие мегаполисы, как Гонконг (6,9 млн.), Шанхай (13,1 млн.), Токио (32 млн.), Сан Пауло (18,3 млн.) и Женьшень (6,2 млн.). К 2015 г. в мире должно возникнуть около 500 мегагородов с численностью населения более 1 млн. (WI, 2009).

Анализ общей тенденции в расселении населения планеты, проведенный Григорьевым и Кондратьевым (2004а,б) показал, что в целом продолжается рост числа городов-миллионеров, но скорости роста значительно отличаются в различных регионах. Глобальные закономерности, характерные для современной динамики населения в городах, в частности, заключаются в следующем:

- В целом в настоящее время урбанизация характерна для всех государств мира. Городов становится больше, выше становится и процент городского населения. Однако темпы урбанизации замедляются.
- Растет число городов-миллионеров. Вместе с тем в государствах высокого уровня развития рост населения в городах - миллионах минимален, в настоящее время он замедляется, а во многих городах прекратился. В слаборазвитых, бедных государствах рост населения в городах-миллионерах, хотя и замедлен, но в значительно меньшей степени.
- Характерная особенность развития урбанизации в настоящее время и в перспективе - образование городов с населением свыше 5 и даже 10 млн. человек, которые принято также называть *мегагородами*. Изучение этих городов представляет исключительный интерес, поскольку они несут черты будущего процесса урбанизации, а по сути дела - черты будущего всего человечества, сосредотачивающие множество положительных аспектов с точки зрения жизнедеятельности населения. Одновременно в таких городах наиболее отчетливо проявляются все отрицательные стороны рассматриваемого феномена, особенно в государствах с развивающейся экономикой.

XXI век является эпохой перехода населения планеты к новым условиям жизни в рамках глобализации многих процессов. Конечно, элементы глобализации различных видов деятельности человека отмечались и раньше, даже многие столетия назад, благодаря торговле, мореплаванию и военным экспансиям. Однако ее современные особенности сильно изменились. Глобализация тех или иных явлений стала происходить значительно быстрее и охватывать большие площади. Резко расширился и диапазон явлений, охваченных планетарными процессами. Главное же состоит в том, что возникли не только цепочки каких-то явлений, которые распространились в глобальном масштабе. Весь мир, самые разнообразные стороны деятельности человека - экономика, политика, наука, техника, технология - оказались вовлечены в процесс глобализации. Более того, весь мир оказался не просто в цепочках, а в "паутине" цепочек тех или иных явлений, которые распространились по планете.

Города, особенно большие, стали своеобразными узловыми точками процесса глобализации. При этом глобализация в городах сопровождается многими положительными явлениями. Среди них такие разные, как, например, оперативность информации о возможных террористических актах, приближающихся тропических циклонах, которые могут угрожать жизнедеятельности населения, сведения о возникновении распространения по планете опасных инфекционных заболеваний, информация о новых лекарствах и многое другое. Известны также и негативные аспекты глобализации, которые наиболее зримо и болезненно проявляются в городах. Среди них: распространение наркотиков, эпидемий, преступности и т.п. Экологические проблемы в городах также содержат негативные компоненты. Это загрязнение атмосферы и гидросферы, высокий риск распространения эпидемий при разрушениях во время землетрясений, ураганов или наводнений.

Контрасты экологической обстановки в городах мира, связанные с социально-экономическими факторами, отчетливо просматриваются на примере доступа населения к объектам санитарии. От этого показателя существенно зависит безопасность населения при возникновении природных бедствий. Наилучший доступ к таким объектам обеспечен в городах Северной Америки (100% доступность), Европы (99%), Австралии и Океании (99%). Значительно более низкий уровень санитарно-гигиенического обеспечения свойственен городам Африки (84%) и Латинской Америки (87%). Весьма низок уровень доступа горожан к нормальному обслуживанию в городах Азии (78%), а самые худшие условия санитарного обеспечения жителей городов зафиксированы в Индии (46%), Нигерии (61%), Ганы и Пакистана (53%) (Krapivin, Varotsos, 2007, 2008).

Города мира существенно различаются по выделяемым ими отходам. Например, ежегодно в среднем города-миллионеры России выбрасывают около 3,5 млн. т. твердых и концентрированных отходов. Их основными составляющими являются (тыс. тонн): зола и шлаки электростанций (550), твердые остатки из общей канализации (420), древесные отходы (400), твердые бытовые отходы (350), строительный мусор (50), автопокрышки (12), бумага (9), текстиль (8) и стеклобой (3). Наибольшее количество отходов отмечается в городах высоко развитых промышленных государств, таких как США и Канада, где суммарные выбросы мусора оцениваются величинами 2,0 и 1,5 кг/чел./сут. В городах Латинской Америки эта цифра составляет 1 кг/чел./сут. Конечно, более важное значение имеет не количество отходов, а возможности и практика их переработки. В отличие от городов США и Канады, где отходы перерабатываются практически полностью, в большинстве городов Южной Америки от 20 до 50% бытовых отходов вообще не удаляются (Gutberlet, 2003).

Большие города являются концентраторами множества антропогенных процессов на небольшой территории, индикаторами состояния которых выступают критерии, оценивающие экологическое, материальное, санитарно-эпидемиологические, социальное, культурное, политические, религиозное и т.п. состояние общества. Все эти сечения многомерного индикаторного пространства выступают как входные переменные при определении опасности, которой могут подвергнуться жители города при возникновении природной катастрофы. Ясно, что для оптимального развития городов в гармонии с окружающей средой несомненный интерес представляют выработка критериев экологического риска в городах и их индикации, разработка эффективной системы индикаторов экологического состояния городов. В настоящее время существует значительное число такого рода индикаторов. Как правило, они касаются отдельных элементов окружающей среды. Примерами могут служить информационные системы оценки качества и состояния водной среды, санитарно-эпидемиологической обстановки, качества атмосферного воздуха и т.д. В работе Алимова и др. (1999) была предпринята попытка многокритериальной оценки качества среды и состояния урбокосистемы Санкт-Петербурга. В работе Flood (1995) описана система индикаторов, используемая ООН при изучении свыше 100 городов мира.

Индикаторы разнообразных явлений в городах являются эффективным средством для анализа и мониторинга взаимодействия между городами и окружающей средой. Среди индикаторов экологической обстановки в городах выделяются две большие группы. К первой из них относятся показатели окружающей среды, непосредственно оказывающие влияние на жизнедеятельность человека, на экологическую обстановку. Прежде всего это касается показателей качества воздуха и воды. Довольно широко используются такие индикаторы, как площадь зеленых насаждений, и в меньшей степени - характеристики их состояния.

В последние десятилетия все большее внимание уделяется ряду геоэкологических характеристик городской среды, вызываемых техногенными причинами. Среди них - уровень шума, радиоактивного загрязнения, воздействия локальных электромагнитных полей. Ко второй группе индикаторов относятся показатели, характеризующие уровень

бедности, здоровье, особенности инфраструктуры, транспорт, состояние жилого фонда и качество управления окружающей средой. Детальный анализ некоторых из них дан в работе Григорьева и Кондратьева (2004а).

В Европе в 1999 г. в рамках концепции "На пути к устойчивому развитию на местном уровне: общеевропейские индикаторы устойчивости" было предложено 10 индикаторов (Григорьев, Кондратьев, 2004б):

- удовлетворение граждан уровнем жизни в населенном пункте,
- вклад города в глобальное изменение климата,
- мобильность населения и пассажирские перевозки,
- доступность мест общественного пользования и услуг,
- качество воздуха в населенном пункте,
- транспортные перевозки детей в школу и из школы,
- управление, отвечающее принципам устойчивого развития,
- шумовое загрязнение,
- устойчивое землепользование,
- производство продукции, способствующее устойчивому развитию.

Основным очевидным недостатком этого ряда индикаторов является его неполнота и некоторая расплывчатость. Здесь отсутствуют такие конкретные индикаторы, как:

- качество питьевой воды,
- уровень смертности (в том числе детская смертность),
- валовой продукт на душу населения,
- количество бедняков и бездомных,
- уровень преступности.

С точки зрения безопасности населения городов при возникновении природных катастроф использование набора индикаторов подобного рода позволило бы решить многие проблемы предотвращения больших потерь человеческих жизней и сокращения экономических ущербов. Решить возникающие при этом задачи возможно путем использования глобальной модели, описывающей максимально большое количество процессов и подсистем окружающей среды. Такая модель предложена в работе Krapivin, Varotsos (2007). Ее реализация возможна только в рамках подписанного 60 странами соглашения об объединении национальных систем наблюдения за окружающей средой в глобальную систему. Прогресс в этом направлении достигнут в 2008 г. после начала общероссийского проекта «Мегаполис».

1.5. Оценка масштабности природных катастроф и их последствий

Понятие масштабности природных катастроф включает географические, пространственные, временные, экологические, экономические и человеческие факторы, каждый из которых имеет специфическую шкалу. В историческом аспекте это понятие претерпело множество изменений, приобретя в современной эпохе вид сложной функции от составляющих ее компонентов. С позиций современного восприятия природных катастроф их масштабность в прошлом определялась дошедшими до нас сведениями или восстановленными данными о катастрофических событиях. Ясно, что в историческом прошлом уровень неблагоприятности явлений природы проявлялся с большей степенью по сравнению с современностью. Как следует из многих раскопок в прошлом, одним из самых разрушительных видов природных катастроф были извержения вулканов. В районах активной вулканической деятельности геологи находят следы поселков и городов, погребенных под толщей пепла, пемзы и лавы. Так, в результате археологических раскопок, проведенных сотрудниками Кёльнского университета, на восточной территории Германии в районе оз. Лаахерзее в Нойвидерской котловине под 15 метровым слоем лавы были обнаружены ранние (с возрастом 11 тыс. лет) поселения людей. Другим примером страшной природной драмы является исчезновение в 79 г. н.э. двух итальянских городов Помпеи и Геркуланума в результате извержения вулкана Сомма (Везувий). История

сохранила сведения о многих трагических событиях на всех континентах, когда исчезали не только большие поселения, но даже цивилизации (Григорьев, Кондратьев, 2001).

Объективно развитие и масштабы опасного природного явления зависят от условий природного фона, который может препятствовать или благоприятствовать распространению явления и, следовательно, ослаблять или усиливать его воздействие на окружающую среду. При этом существует взаимосвязь между природными катастрофами.

Масштабность жертв среди населения зависит от уровня развития общества, который проявляется в степени разработанности системы прогнозирования, предупреждения и предотвращения возможных природных катастроф. Фактически речь идет о формировании множества факторов, которые могут рассматриваться как природные и социальные предвестники природной катастрофы (табл.1.17). Масштабная оценка природной катастрофы зависит от реакции человека на стихийное бедствие. Например, опасность тропических циклонов определяется совокупным действием всех их элементов - ветра, дождя, штормовых нагонов и волн. Скорость ветра в тропических циклонах может превышать 250 км/ч, занимая полосу шириной 40-800 км. При таком ветре рушатся строения, выходят из строя коммуникации и уничтожается растительность. В результате тропические циклоны могут вызывать гибель людей или наносить им телесные повреждения. Во время тропических циклонов может выпасть до 2500 мм осадков, результатом чего являются наводнения. Важным фактором служат штормовые нагоны - это подъем морских вод выше среднего уровня океана до 7 м и более, что приводит к быстрому затоплению низких участков побережья. Наконец, сочетание ветра и штормового нагона приводит к распространению высоких волн, которые уничтожают пляжи, сельскохозяйственные земли, постройки и здания в прибрежной зоне. Само тело циклона движется обычно со скоростью не более 24 км/ч возрастающей до 80 км/ч по мере удаления циклона от места возникновения. Сопровождающие его гигантские волны обладают большой разрушительной силой.

Таблица 0.37. Возможные предвестники природной катастрофы $\{x_i\}$.

Природная катастрофа	Предвестники природной катастрофы
Извержение вулкана	Амплитуда тектонических подвижек, температура поверхности, изменение состава газовых эманаций, содержание SO_2 и др.
Землетрясение	Уровень грунтовых вод, амплитуда колебаний поверхности, эманация газов, ионосферные аномалии и др.
Наводнение	Динамика уровня реки, температура атмосферы, изменчивость осадков, глубина снежного покрова
Тропический циклон	Скорость ветра, атмосферное давление, температура поверхности океана, изменчивость температуры атмосферы, сдвиг ветра, озоновая дыра и др.
Пылевая буря	Альбедо, скорость ветра
Оползень, селевой поток	Изменения в рельфе и ландшафте, интенсивность осадков, поверхностное и глубинное пористое давление воды и др.
Лесной пожар	Температура, интенсивность осадков, влажность почвы, возраст леса и др.

Оценка размеров ущерба от тропических ураганов возможна не во всех случаях. Во многих странах, особенно с преимущественно аграрным сектором экономики, убытки в денежном выражении в большинстве случаев не определяются по причине отсутствия статистических служб и обученного персонала. Поэтому в целом по земному шару нет достоверной статистики о последствиях природных катастроф, а из-за этого невозможно оценить их масштабы во многих регионах. Наиболее хорошо развита служба оценки последствий природных катастроф в США и в других промышленно развитых странах, где существует развитая инфраструктура систем геоинформационного мониторинга. Эта система состоит из различных уровней наблюдения за районами возможного возникновения ураганов, положение которых хорошо известно. Изображения тропических

ураганов, полученные из космоса, говорят о том, что моменты их возникновения хорошо видны в оптическом и инфракрасном диапазонах (Бондур, Воляк, 1984).

Многолетние наблюдения за тропическими циклонами на территории США изобилуют сведениями, как об их параметрах, так и разрушениях. Здесь следует отметить ураган "Камилла", который пронесся над территорией США в 1969 г. и был одним из самых разрушительных стихийных бедствий. Погибло 248 человек и свыше 8 тыс. человек были ранены. Экономический ущерб составил 1,4 млрд. дол. Ураган "Большая змея", обрушившийся волнами 10-ти метровой высоты на японские острова в середине октября 2004 г. унес жизни 62 человек, затопил многие суда, стоявшие у причалов портов, и причинил огромные разрушения в прибрежной зоне. Ураган Isabel во второй половине сентября 2003 г. одним ударом опустошил огромную территорию на восточном побережье США, разрушив более 360 тыс. домов и нанес ущерб в 5 млрд. долларов. При этом погибло 40 человек. Вообще 2003 год для территории США характеризуется резким возрастанием природных бедствий. За весь год во время тропических ураганов погибло 68 человек, а экономический ущерб составил 5,89 млрд. долларов (страховые выплаты составили 2,43 млрд. долларов). Многочисленные ураганы весной и летом как в метеорологическом, так и в страховом секторе побили все рекорды предыдущих лет. Ураганы вызвали оползни и обвалы в Техасе и Северной Каролине, мощная снежная буря накрыла северные штаты, а лесные пожары пронеслись через южные районы Калифорнии. В последующие годы тропические циклоны были не менее разрушительными. Только в 2008 г. их было более 50 в регионе Флориды.

Вследствие этих событий страховые потери от природных катастроф превзошли самый высокий уровень, который имел место в 1994 г. Только две суровых зимних бури привели к ущербу в 500 млн. долларов, не считая того, что рекордные снегопады в северо-восточных городах вызвали серьезные неудобства для населения и муниципальных служб. Так в марте 2003 г. в Алабаме, Денвере и Джорджии выпало 81 см. снега, а в Колорадо высота снежного покрова достигала 220 см. Сильные морозы в конце января блокировали на северо-востоке США речные транспортные системы, а в Алабаме и Джорджии 16-18 февраля 2003 г. выпал град с градинами диаметром до 7,5 см.

Тропические ураганы ежегодно уничтожают большие лесные массивы, что может иметь глобальные последствия, так как леса являются стоками избыточного CO₂ из атмосферы. Ураганы изымают углерод из лесов и тем самым влияют на глобальный тепловой баланс. Масштабность этого влияния по оценкам McNulty (2002) только для территории США составляет 20 ТгС/год изымаемого из обращения углерода. Ураганы большей частью воздействуют на юго-восточное побережье США, которое на 55% покрыто лесами. Один ураган способен изъять из обращения около 10% ежегодной продукции лесов, что в пересчете на стоимость получаемой древесины составляет около одного млрд. долларов. McNulty (2002) проанализировал данные за 1900-1996 гг. о потерях углерода по причине воздействия ураганов на лесные системы на территории США и пришел к выводу, что ураганы переводят большое количество живой биомассы в мертвую органику, которая затем используется в строительстве, либо сжигается или разлагается с участием микроорганизмов. В результате значительная часть углерода возвращается в атмосферу.

Таким образом, ураганы являются важным фактором долговременного воздействия на климат. Конечно, ураганы способствуют омоложению лесных массивов, но для восстановления уничтоженного им лесного полога требуется 15-20 лет, а это означает, что на этот период сток атмосферного CO₂ на данной территории уменьшается.

К числу масштабных природных катастроф относятся наводнения, которые часто сопровождают тропические ураганы, а также возникают в поймах рек при продолжительных и мощных осадках или быстром таянии снега. Одним из характерных примеров мощного наводнения является ситуация, возникшая в сентябре 2000 г. в центральной Японии в результате проливных дождей, вызванных тайфуном "Саомай".

Возникшее наводнение парализовало работу автомобильного концерна Тойота, погибли 8 человек и было эвакуировано почти 500 тыс. человек. Был затоплен город Нагоя. Центральная часть острова Хонсю осталась без электроэнергии. Движение пассажирских поездов прервано. Многие автомобильные магистрали длительное время были блокированы. Примерно в это же время над Японским и Охотским морями пронесся тайфун "Маэми", который в ослабленном виде достиг Камчатки и со скоростью ветра 20 м/с нанес незначительные повреждения в Елизовском, Усть-Большерецком районах и г. Петропавловск-Камчатский.

Среди характерных примеров последствий тайфунов и штормов можно указать на ряд событий, произошедших в 2002 г. В августе на Майорке в течение трех часов выпало 224 мм осадков, что вызвало ряд оползней и привело к возникновению бурных грязевых потоков. 12 августа в Дрездене выпало 154 мм осадков за сутки, а в ночь с 8 на 9 сентября на юге Франции за 36 часов осадки составили 670 мм. Эти примеры говорят о том, что возникновение экстремальных ситуаций носит случайный характер и их прогнозирование является задачей предсказания случайных процессов. Эта задача усложняется при возможном сочетании нескольких явлений, как, например, это произошло в июле в Таджикистане. Здесь после нескольких дней проливных дождей произошло землетрясение и пронесся ураган. В результате пострадали более 700 жилых домов и множество административных зданий, а также было нарушено электроснабжение во многих населенных пунктах.

В пространственном отношении наводнение, как экстремальное природное событие, в большинстве случаев возникает на территориях, прилегающих к руслам рек, или в зонах засушливого климата с ливневым типом осадков. Наводнения характеризуются высоким уровнем ущерба, так как независимо от защитных сооружений возможны такие экстремальные подъемы воды в реках, когда потоки воды начинают уничтожать на своем пути мосты, здания, технику и размывать дороги, изменяя окружающий рельеф.

Наводнения происходят практически во всех регионах земного шара. В каждом случае они приносят большие неприятности населению. Так в Индии, июльское 2004 г. наводнение на северо-востоке страны снесло десятки деревень, оставив без крова 35 тыс. жителей, а также смыло водой большое количество бульдозеров, работавших на берегу разлившейся реки. В результате погибло 40 человек. Произошедшее в это же время наводнение в России на Кубани нанесло Краснодарскому краю ущерб около 200 млн. рублей. Наводнение, произошедшее 17 августа 2004 г. в Великобритании, возникшее в результате выпадения 6 см осадков за сутки в районе населенного пункта Боскасл, создало на улице этого поселка реку, которая уносила автомашины, дома и фургоны. Во время июльского 2004 г. наводнения в юго-западном Китае в двух уездах провинции Юньнань погибли 11 человек, шесть человек получили серьезные увечья и 34 пропали без вести. Наводнение вызвало сильные селевые потоки и оползни, которые серьезно повредили более двух тысяч крестьянских домов, нанеся ущерб в 33.7 млн долларов.

Непредсказуемость и коварность наводнений подтверждается событием, произошедшим 9 января 2005 г., которое возникло в результате мощнейшего урагана, обрушившегося на север Европы и Скандинавию. В Германии, Англии и Швеции погибло 14 человек, и десятки человек пострадали или пропали без вести. Ураганные ветры (≈ 30 м/с) вынудили Швецию и Латвию преодолевать большие потери в электроэнергии, возникших в результате разрушения линий электропередачи. В эстонском городе Пярну вода поднялась на 2,8 м выше нулевой отметки, в результате чего почти 25% городской территории оказалась затопленной. Ураган прошел по Псковской, Ленинградской и Калининградской областям России. Так в Санкт-Петербурге 9 января 2005 г. из-за угрозы затопления были закрыты ряд станций метрополитена, остановлена работа котельной в Петроградском районе и приняты превентивные меры в ряде других районов города. Явилось ли это наводнение следствием землетрясения 26 декабря 2004 г. в так называемом

"Поясе опасности" или это самостоятельное событие в динамике окружающей среды покажут последующие исследования.

Наводнения как чрезвычайные природные явления могут развиваться медленно, постепенно изменяя структуру окружающей среды ограниченного региона, а при глобальном потеплении климата возможны крупномасштабные затопления больших территорий. В качестве конкретного примера можно указать на подъем за последние несколько десятилетий уровня Каспийского моря почти на 3 м, в результате чего из землепользования выведено более 400 тыс. га прибрежных территорий, что привело к экономическим потерям на уровне 6 млрд. долларов и пострадало более 100 тыс. человек.

Мощными поражающими факторами сопровождаются землетрясения, которые приводят к горизонтальному перемещению поверхностных слоев суши, а на море вызывают цунами. В результате разрушаются жилища и погибают люди. Крупные землетрясения ощущаются на больших территориях, достигающих свыше 4 млн. км². Интенсивность сотрясения и соответственно разрушительное воздействие землетрясения на этой территории определяется типом грунта.

Для измерения масштаба землетрясения применяются магнитудные шкалы. Так в Японии используется шкала из семи магнитуд, но наиболее распространена шкала Рихтера (Richter, 1969). Смысл этой шкалы заложен в уравнении $\log E = 11,4 + 1,5 M$, где E – суммарная высвобождающаяся энергия, M – магнитуда, соответствующая амплитуде горизонтального смещения. Согласно этой зависимости каждая последующая единица шкалы Рихтера означает, что высвобождающаяся энергия в 31,6 раза больше той, которая соответствует предыдущей единице шкалы. В соответствии с этим к сильнейшим землетрясениям можно отнести землетрясения с магнитудой 7 и выше. Примерами таких землетрясения являются землетрясение 1906 г. в Сан-Франциско (магнитуда 8,25), токийское землетрясение 1923 г. (магнитуда 8,1), асамское землетрясение 1950 г. (магнитуда 8,6), аляскинское землетрясение с магнитудой 8,4-8,6 и мощнейшее Гоби-Алтайское землетрясение 4 декабря 1957 г. (магнитуда 8,1). Только в ноябре 2004 г. было зарегистрировано 4 землетрясения с магнитудой более 7: два в Индонезии (11 ноября – магнитуда 7,5 и 26 ноября – магнитуда 7,2), на западном побережье Новой Зеландии (магнитуда 7,1) и на западном побережье Колумбии (15 ноября – магнитуда 7,2). Число жертв при землетрясении зависит от плотности населения и его готовности. Так упомянутое Гоби-Алтайское землетрясение ощущалось на площади более 5 млн. км², включая всю территорию Монголии, юг Бурятии, Иркутскую и Читинскую области и северные провинции Китая, но из-за малой плотности населения не привело к большим жертвам.

На земном шаре по данным геологической службы США (USGS) ежегодно регистрируется около 20 тыс. землетрясений, из них 18 имеют магнитуды 7,0-7,9 и одно превышает по магнитуде уровень 8,0 по шкале Рихтера. В США население 39 штатов подвергается риску от землетрясений. Именно в США создана самая совершенная и разветвленная сейсмическая система ANSS, которая оснащена 6000 датчиков с временем оповещения 5-10 мин. USGS в рамках реализации национальной сейсмической программы NEHRP, начиная с 2001 г., установило более 300 датчиков во многих крупных городах, таких как Сан Франциско, Сиэтл, Анкоридж, Лас Вегас и Мемфис, чтобы повысить вероятность своевременной регистрации землетрясения и улучшить оперативность оповещения населения об опасности. Именно поэтому, например, ряд землетрясений в 2003 г. на территории США не причинил значимого ущерба.

Одной из особенностей землетрясений и извержений вулканов является их способность вызывать вторичные природные процессы, такие как оползни, обвалы, сели, цунами и наводнения. Каскадный характер землетрясений часто проявляется в плотно заселенных регионах в виде пожаров, взрывов газа и других косвенных факторов (затопления, поражения электрическим током). Потоки лавы, попадая на покрытые снегом или льдом горные склоны, вызывают селевые потоки и наводнения. Горячий селевой

поток, набирая мощность, постепенно может переходить в лавину, а затем с дальнейшим таянием снега и льда переходить в мощный водный поток, который, вырвавшись из горных ущелий, превращается в разрушительную силу.

Как уже отмечалось, волны цунами надвигаются с огромной скоростью к побережью, вызывая огромные разрушения. Среди примеров таких бедствий можно указать на событие, произошедшее 5 ноября 1952 г. на Курильских островах. Тогда чудовищных размеров волна, налетевшая с океана, полностью накрыла остров Парамушир, так что под водой скрылся весь город Южнокурильск. Всего лишь несколько минут понадобилось разбушевавшейся стихии, чтобы уничтожить все живое и произвести гигантские разрушения.

Среди примеров крупных разрушений и потерь человеческих жизней от цунами можно указать также следующие события. 1 апреля 1946 г. в результате землетрясения с магнитудой 7,3 вблизи Алеутских островов возникшие волны цунами унесли жизни 159 человек на Гавайях и причинили ущерб более 26 млн. долларов. Землетрясение с магнитудой 8,5, произошедшее юго-восточнее Камчатки 5 ноября 1952 г. вызвало мощное цунами, которое с огромной скоростью пронеслось по северной части Тихого океана. 9 марта 1957 г. в зоне Алеутских островов произошло землетрясение с магнитудой 8,3. В результате образовалась волна цунами высотой 23 м, которая обрушилась на острова Умнак и Канай, совершив огромные разрушения. Землетрясение с магнитудой 8,3 на морском дне у побережья Чили вызвало волну цунами, достигшей Гавайских островов и унесшей жизни 61 человека. Было разрушено 537 домов с причиненным ущербом более 23 млн. долларов. На Гавайских островах в результате волны цунами высотой 14 м, возникшего 29 ноября 1975 г. после землетрясения с магнитудой 7,2, был нанесен ущерб в 4,1 млн. долларов. Наконец, землетрясение с магнитудой 7 в западном секторе моря Бисмарка 17 июля 1998 г. вызвало цунами, которое убило 2202 человека и разрушило жилища у 10 тыс. жителей прибрежных регионов.

Схожие по масштабам разрушения производят торнадо (смерчи), которые обычно возникают неожиданно и действуют на ограниченной территории кратковременно. Средняя длина пробега торнадо составляет около 25 км с полосой охвата, не превышающей 400 м. Возникновение смерча связано с грозовыми облаками при наличии резкого контраста температуры, влажности, плотности и других параметров воздушных потоков. Обычно смерч возникает в зоне соприкосновения прохладного и сухого воздуха с теплым и влажным воздухом, находящимся в приземном слое атмосферы. В результате в узкой переходной зоне возникает сильный ветер, приводящий к появлению вихря.

Разрушения, вызванные торнадо, ужасны. Торнадо разрушают здания, выкорчевывают деревья и поднимают в воздух, как бы всасывая гигантским насосом, автомобили, фрагменты зданий и любые тяжелые предметы, в том числе и людей. Для оценки возможных последствий от торнадо обычно применяют шкалу Fujita - Pearson (табл. 1.1), которая, несмотря на ее субъективность, помогает ранжировать торнадо по уровню их опасности. Ведущаяся в США статистика торнадо говорит о том, что по территории США в среднем около 69% бывает умеренных (слабых) торнадо с продолжительностью от одной до десяти минут. Смертельные исходы при них не превышают 5% от всех жертв от торнадо. Более сильные торнадо возникают в 29% случаев и делятся более 20 минут, принося 30% смертельных исходов. Неистовые и яростные торнадо возникают в 2% случаев, но человеческие жертвы при них составляют 65% от жертв при всех торнадо. Они осуществляют разрушения в течение часа и более. По данным за 2003 г. только за первые 10 дней мая по территории США пронеслось 412 торнадо при скоростях ветра 330-420 км/ч. В Южной Дакоте и Миссисипи 4 мая было зарегистрировано 94 торнадо. Многие из них охватывали полосу шириной до 450 м на расстоянии 24 км. Несмотря на принимавшиеся превентивные защитные меры, ущерб составил 6 млрд. долларов.

Большой ущерб наносят крупные лесные пожары, которые возникают как по естественным, так и по антропогенным причинам. Об их масштабности можно судить по количеству ежегодно регистрируемых крупных пожаров на территории диких земель. Так, за последние годы последовательно регистрировалось 12300 лесных пожаров в 2000 г., 84079 в 2001 г., 88458 в 2002 г. и 29634 в 2003 г. Соответственно за этот период сгорело лесов на территориях 3,4 млн. га в 2000 г., 1,4 млн. га в 2001 г., 2,8 млн. га в 2002 г. и 4,1 млн. га в 2003 г. Ежегодно на территории России возникает от 12 до 37 тыс. лесных пожаров, которыми уничтожается 0,4-4,0 млн. га лесов с экономическим ущербом в сотни млн. долларов. Независимо от причин возникновения, лесной пожар обычно быстро распространяется в пространстве, превращаясь в масштабное бедствие. Так в январе 2002 г. лесные пожары в окрестностях Сиднея (Австралия) приняли угрожающие масштабы, повредив ряд национальных парков и вплотную приблизившись к городу. Леса выгорели на площади 0,5 млн. га, а задымление атмосферы распространилось на все юго-восточное побережье Австралии. В США в 2003 г. поздним октябрем на юге Калифорнии были зарегистрированы необычно активные лесные пожары, всего же по стране было отмечено около 60000 загораний лесов на площади 1,62 млн. га. В предыдущем 2002 г. загорания лесов фиксировались в 90000 случаев на общей площади 2,92 млн. га. В среднем за 1993-2002 гг. на территории США ежегодно происходило 100000 пожаров на площади 1,74 млн. га. Очень крупный лесной пожар на территории США был зарегистрирован в июне 2002 г. южнее г. Денвер (шт. Колорадо). Площадь пожара составляла 36000 га.

Тушение лесных пожаров требует концентрации большого числа специальных противопожарных средств, базирующихся на земле и в воздухе. Характерным примером возникающих при этом ситуаций являются ежегодные природные пожары и борьба с ними на территории России. Одной из причин природных пожаров является повышенная температура атмосферы, приводящая к высыханию подстилки и созданию благоприятных условий для распространения огня.

Наиболее опасны периоды засушливых сезонов, когда на длительный период времени создается дефицит влажности почвы, а реки и водоемы мелеют. Такие ситуации довольно часто возникают в Африке, Австралии, Центральной Америке и Азии. Например, во время засухи 2002 г. на юге Индии погибло более тысячи человек. В китайской провинции Аньхой летом 2003 г. была отмечена самая сильная за 25 лет засуха, возникшая в результате сочетания высокой температуры ($41,3^{\circ}\text{C}$) и сокращения осадков на 81,7%. В частности, в окрестностях г. Хуаншань дефицит почвенной влаги ощущался на площади 43 тыс. га сельскохозяйственных посевов (89% всех посевых площадей). От засухи часто страдают многие рисоводческие районы Индонезии. В более северных широтах засухи отмечены в Башкирии, где они возникают при сочетании ряда агрометеорологических явлений, наиболее важным из которых является вторжение арктического воздуха, содержащего мало влаги.

Масштабность воздействия природных пожаров на климат может проявиться косвенным образом через изменение газового обмена в системе "атмосфера-почва" в зонах вечной мерзлоты. Обусловленное пожарами потепление почвы может привести к усилению процессов дыхания и, тем самым, способствовать интенсификации выбросов CO_2 в атмосферу на протяжении интервала времени до 10 лет после пожара (Кондратьев, Григорьев, 2004а,б). В связи с этим следует отметить, что высокоширотные экосистемы занимают 22% поверхности суши и содержат около 40% глобального почвенного углерода. При этом значительная часть принадлежит к зоне вечной мерзлоты, динамика которой определяется циклами деградации (образования термокарста) и аградации. Эти циклы находятся в тесной связи с лесными пожарами, которые представляют собой главное возмущающее воздействие для boreальных лесов. За последние десятилетия в boreальных и арктических регионах Канады и Аляски отмечено повышение примерно на $1,5^{\circ}\text{C}$ температуры почв, захватившее и зоны вечной мерзлоты. В результате наметились

изменения в скоростях фиксации азота, роста мха, изменения глубины слоя органики и дренажа почвы.

Как уже отмечалось, масштабы природных катастроф нарастают как по частоте их появления, так и по приносимым ущербам. Об этом говорят сведения о потерях и ущербах за последние годы. Достаточно отметить, что, например, в 2003 г. от природных катастроф в мире погибло более чем 50 тыс. чел., в то время как в 2002 г. эти потери составляли 11 тыс. чел (Zimmerli, 2003). Только за счет жары в Европе и землетрясения в Иране погибло более чем 20 тыс. чел. При этом за 2002 г. и 2003 г. экономические потери составили 55 и 60 млрд. долларов, основной вклад в которые внесли торнадо, жара, лесные пожары и наводнения в Азии и Европе. Следует также отметить неустойчивый характер появления природных катастроф во времени с чередованием, казалось бы, несовместимых явлений. Например, в Индии, Пакистане и Бангладеш в мае-июне жара достигала 50°C, а с июня по сентябрь последовала череда мощных наводнений (Krapivin, Varotsos, 2008).

Следует также отметить, что при интегральной оценке масштабности природных катастроф и последствий необходимо учитывать статистику экономических потерь. К сожалению, такая статистика ведется не во всех странах. Знание же распределения ущербов по типам природных катастроф важно для страховых компаний. Например, для США в 2003 г. имело место такое распределение экономических (страховых) потерь: тропические циклоны - 38 (49)%, землетрясения и извержения вулканов - 19 (16)%, наводнения - 16 (3)%, грозы (13 (16)%, зимние метели - 11 (10)% и другие события - 3 (6)%. Отношение экономических потерь к страховым выплатам за нанесенный природной катастрофой ущерб за последние десятилетия в США уменьшилось с 6 в 1950 г. до 2,4 в 2003 г., что говорит об эффективности стратегии страхования (Бондур и др., 2009; Zimmerli, 2003).

В последнее время появилась новая категория возможных природных катализмов, источником которых может быть космос. Специалисты, изучающие планеты и астрофизики все чаще говорят о том, что за прошедшие 6 тысяч лет на земле было до 30 крупных природных катастроф, вызванных столкновением нашей планеты с космическими объектами. Эти утверждения основываются на археологических и палеонтологических данных, а также при этом используются различные модели и сведения мифологического характера. Масштабность некоторых подобных катастроф оценивается мощностями в 10^5 – 10^6 мегатонн. В связи с этим имеются гипотезы о возникновении на поверхности земли многих образований именно по причине подобных катастроф. Среди них указывается на Каспийское море.

Проблема столкновения земли с космическими телами обсуждалась и раньше в связи с наблюдениями за движением комет и предсказаниями их орбит. Уже в 18-м веке астрономы могли достаточно уверенно оценивать возможность таких столкновений. При этом, парадокс состоял в том, что на фоне такой уверенности полностью отсутствовали предсказания крупных землетрясений, таких как землетрясение 1 ноября 1755 г., полностью разрушившее город Лиссабон. В тоже время математики очень уверенно предсказывали движение кометы Галлея, убеждаясь в своей точности в периоды ее появления в 1835, 1910 и 1986 гг.

Когда-нибудь в будущем Земли таится катализм, который будет вызван столкновением с большим космическим телом. Когда это случится, это будет возможным очередным планетарным событием, которое вероятно имело место в прошлом и создало условия появления и развития жизни. Такая гипотеза обсуждается многими учеными, уверенными в том, что именно столкновение земли с кометой или астероидом в будущем станет переломным моментом в эволюции, став причиной гибели нашей цивилизации и возникновения новой, как это было в прошлом. Поэтому изучение истории катастроф (табл. 1.18 и 1.19) и расширение базы знаний о них является необходимым элементом решения таких задач, как:

Таблица 1.18. Характеристика ущербов, нанесенных некоторыми природными катастрофами в 2006 г. (Zanetti et al., 2007).

Природные катастрофы	Число событий	Число жертв	Экономические потери (млн. долларов)	
			Всего	Страховые
Землетрясения	8	5880	241,5	80
Наводнения	58	7217	2970,6	984
Штормы	47	4600	24950,9	8265
Засухи, пожары, жара	5	2259	362,3	120
Холода, морозы	12	1617	4105,7	1360
Град	5	19	3103,4	1028
Цунами	1	19	3,0	1
Всего	136	22394	35737,4	11838

Таблица 1.19. Динамика природных катастроф и их последствия (Бондур и др., 2009)..

Год	Количество чрезвычайных ситуаций природного характера				Количество погибших (тыс. чел.)	Экономические потери (млрд. долларов)
	Наводнения	Метели, морозы, ураганы	Землетрясения, извержения вулканов	Прочие природные катастрофы		
1	2	3	4	5	6	7
2002	294	104	175	126	11	55
2003	203	293	84	119	78	65
2004	150	293	83	115	183	145
2005	181	259	91	117	101	212
2006	281	340	76	153	20	50
2007	362	442	88	88	20	82

- развитие и совершенствование стратегии взаимодействия человека и природы, обеспечивающей устойчивое развитие;
- анализ знаний предистории природных катастроф и поиск технологий использования этих знаний для оценок будущих тенденций в развитии человечества, позволяющих выявлять предельные нагрузки на природу;
- осознание роли и места человеческой компоненты СПО в космическом пространстве.

Решение этих и аналогичных задач возможно с использованием данных за последние 6 тыс. лет существования современной человеческой цивилизации, имеющихся в археологии и палеонтологии. Роль информатики здесь должна проявиться в преодолении высокого уровня неопределенности момента возникновения природных катастроф, достигаемого за счет создания новых высокоеффективных технологий их прогнозирования. Особенно важной является задача предсказания экологических последствий природных катастроф, которые могут проявляться, постепенно нарастая, через десятилетия в виде снижения продуктивности экосистем, изменения структуры водного баланса территории и нарушения жизненно важных параметров окружающей среды. Другими словами, при развитии технологии оценки масштабности природных катастроф необходимо учитывать целый комплекс критериев: медико-биологических, экономических, социальных, ботанических, почвенных, зоологических и геодинамических. Одним из элементов этой технологии является классификационное ранжирование природных катастроф и привлечение знаний из различных наук, особенно обладающих перспективными технологиями будущего применения. Одним из актуальных вопросов, возникающих на рубеже грядущих изменений окружающей среды, является понимание роли изменения климата в процессах генетической модификации. Аналогичные проблемы сейчас интенсивно дискутируются учеными различных областей знания. Morris et al. (2003)

рассмотрели и сопоставили многие модели, которые описывают изменение окружающей среды, и отметили их ограничения, а также рассмотрели такой важный вопрос, как соотношение временных и пространственных масштабов при учете в этих моделях воздействий на окружающую среду за счет антропогенного использования ресурсов энергии, воды, земли и атмосферы, а также попытались оценить роль технологий и экономики в формировании этих воздействий. Blowers и Hinchliffe (2003) сфокусировали свой анализ на выявлении корреляций между изменениями окружающей среды и техническими, экономическими и политическими откликами на эти изменения, поставив множество вопросов о существующих неопределенностях и риске таких взаимодействий. Hardy (2003) классифицировал потенциальные исходы изменения климата для планеты в целом и для населения, в частности, обрисовав возможные перспективы развития взаимоотношений общества и природы.

1.6. Пространственно-временные характеристики природных катастроф

Пространственное и временное распределение природных катастроф каждого типа хорошо известно и незначительно изменяется со временем. Практически на Земле сегодня нет места, где бы не происходили природные катастрофы. Рис. 1.7 в какой-то степени характеризует это распределение.

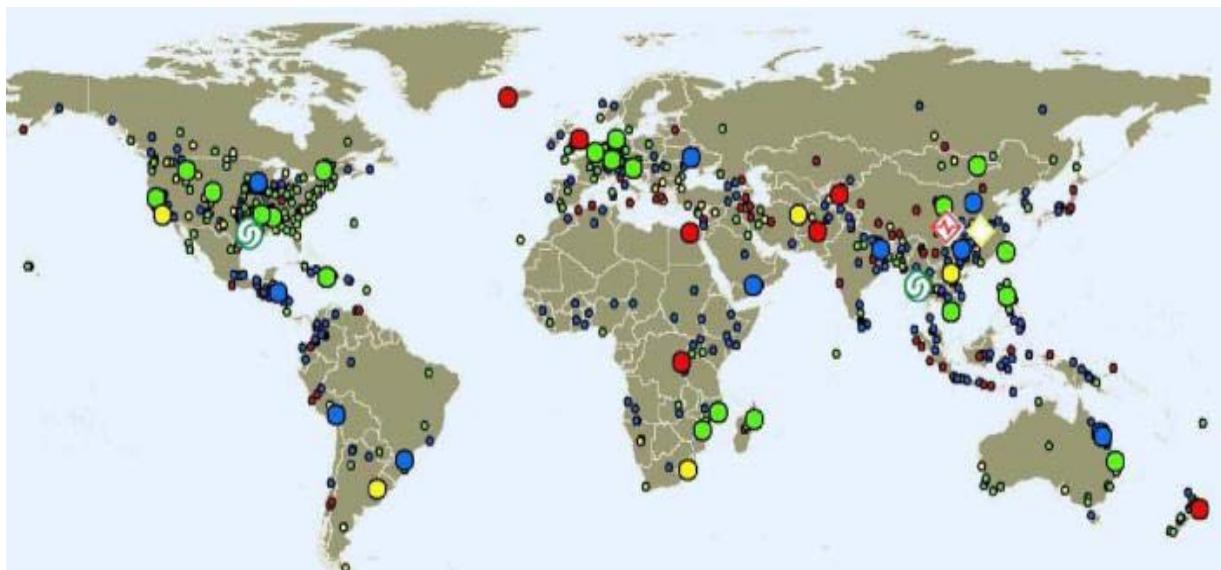


Рис.1.7 Природные катастрофы в 2008 г. Географическое распределение чрезвычайных природных явлений, произошедших в 2008 г. Относительное соотношение мощности событий отображено размерами кружочков, цвета которых соответствуют типам событий: красный – землетрясения, цунами и извержения вулканов; синий – наводнения; зеленый – зимние холода, ураганы и метели; желтый – экстремальные температуры (жара, лесные пожары), перемещения грунтов (оползни, лавины и т.п.); - ураган Ike (6-14 сентября 2008 г., Карибский бассейн, США), - землетрясение 12 мая 2008 г. в Китае, - зимние холода в Китае в период с 10 января по 13 февраля 2008 г..

Тем не менее, в связи с отмечаемым за последнее время ростом числа экстремальных природных явлений возможно смещение зон повышенной опасности. Достаточно привести примеры рекордного увеличения экстремальных погодных условий в 2004 г. в Европе. Так в июне на юге Франции средняя температура превысила порог в 40 градусов, что выше нормы на 5-7 градусов. В Швейцарии июнь оказался самым жарким за 250 лет. От небывалой жары пострадали многие регионы Индии, где температура превышала среднюю норму на 5 градусов. В США в 2004 г. был установлен рекорд по количеству торнадо. Только в мае их было зарегистрировано 562. Проливные дожди залили Шри-Ланку, вызвав крупные наводнения и оползни. Данные, например, табл. 1.5 в какой-то мере характеризуют нарастание одного из опасных природных явлений, которым является землетрясение.

Нарастающая неоднородность появления природных катастроф, как в пространстве, так и во времени объясняется увеличением антропогенной составляющей и естественным трендом климатической системы. Вопрос об их соотношении неоднократно обсуждался в научной литературе (Григорьев, Кондратьев, 2001). Отмечено, что региональные особенности последствий природных катастроф характеризуются четкими показателями их территориальной плотности. Наиболее низкая плотность природных катастроф (одна катастрофа на 470 тыс. км²) приходится на Северную Америку. Среднее положение по величине этого индекса занимают Африка, Европа и Южная Америка, где он равен одной катастрофе на 270, 240 и 230 тыс. км², соответственно. Районы Центральной Америки и Карибы, Азия с Австралией и Океания характеризуются самой высокой территориальной плотностью природных катастроф (одна катастрофа на 150, 120 и 80 тыс. км², соответственно). Таким образом, за последние 40 лет, принимая во внимание указанный показатель территориальной плотности природных катастроф, можно сделать вывод о том, что наиболее пораженными опасными природными явлениями стали территории Австралии, Азии, Карибского бассейна, Океании и Центральной Америки. Но этот вывод не соответствует территориальному распределению масштабов ущербов от природных катастроф, так как не отражает их зависимости от состояния экономики и других факторов развития общества.

Как уже отмечалось выше, спектр и пространственное распределение природных катастроф сложились в процессе эволюции Земли. Однако, заглядывая в будущее, следует отметить, что с развитием цивилизации со временем может измениться как пространственное распределение, так и состав природных катастроф. Согласно мнению многих исследователей в будущем нас ожидают принципиальные изменения. Вот некоторые из возможных изменений:

- *Землетрясения и наводнения* даже через десятилетия все еще будут убивать десятки тысяч людей в развивающихся странах, а развитые страны будут по-прежнему испытывать большие экономические потери и торможение прогресса во многих сферах жизни.
- *Эпидемии* несмотря на развитие медицины по-прежнему будут препятствовать установлению здорового образа жизни за счет возникновения новых видов заболеваний, к появлению которых может оказаться причастной генная инженерия.
- *Глобальное потепление*, предсываемое многими экспертами и политиками, за счет последствия таяния снегов, ледников и вечной мерзлоты принесет бедствия 40% населения планеты. Наблюдаемые потери снежных и ледовых масс происходят значительно быстрее, чем предполагалось ранее. Об этом говорится в новом докладе, опубликованном Программой ООН по Окружающей Среде (UNEP, 2008). Авторы доклада утверждают, что таяние снегов и льдов может вызвать затопление береговых районов и островов, наводнения и оползни, особенно в горных районах. Сокращение снежных и ледяных покровов также приводит к тому, что почва и полярные океаны поглощают больше солнечного тепла, а это, в свою очередь, может ускорить темпы изменения климата.

В докладе указывается, что в Антарктике и Гренландии хранится 98-99% поверхностного пресноводного льда планеты. Если ледяной покров Гренландии полностью растает, то уровень мирового океана может подняться на 7 метров. Но даже в случае, если ледяная шапка Гренландии растает на 20%, а Антарктики на 5%, то это приведет к подъему уровня мирового океана на 4-5 метров. Это все может произойти в ближайшие столетия. Таяние этих ледниковых покровов вместе с таянием горных ледников и снежных шапок, уже привело к тому, что уровень мирового океана поднялся на 20 см в период между 1870 и 2001 годом. Причем уровень океана поднимался ежегодно на 3 миллиметра в период между началом 1990-х и 2006 годом.

Ледник Упсала в Патагонии (Аргентина) был одним из самых больших ледников Южной Америки, но теперь исчезает на 200 м в год (источник: <http://greenword.ru/2007/12/global-warming.html>).

Количество льда, которое может растаять, непосредственно влияет на жизнь людей, которые проживают на низинных территориях и островах. Повышение уровня океана на 1 метр приведет к тому, что 145 млн. человек окажутся в районе затопления и наводнений. В этом случае, глобальный ущерб превысит \$950 млрд.

- *Агрессия* одних *народов* на территории проживания других может создать прецедент колонизации и принципиальной смены образа жизни населения Земли. Сокращение традиционных запасов биологической пищи и минеральных ресурсов может вызвать изменение видов, которые смогут приспособиться к употреблению в качестве пищи энергию солнца или некоторые химические элементы, которыми богат Мировой океан, например, дейтерий.

- Воздействие *космических тел* на Землю в будущем может вызвать резкое глобальное изменение климата, что приведет к всемирной катастрофе. Комета или астероид диаметром в несколько километров способны опустошить огромные пространства, как за счет прямого физического воздействия, так и путем возникновения пожаров, мощных цунами и других чрезвычайных явлений, а в случае смены орбиты жизнь на Земле может исчезнуть. Вероятность такого события ничтожна.

- Приближение Земли к *суперновой звезде* может привести к гибели всего живого на поверхности из-за высокой радиации. Но такая возможность может оказаться не раньше, чем через несколько миллионов лет.

- *Глобальное оледенение* может возникнуть в ближайшие 10 тыс. лет как альтернатива ожидаемому потеплению климата.

- Изменение *магнитного поля* Земли путем смены полюсов может уничтожить озоновый слой и тем самым вызвать необратимые изменения в биосфере.

- *Техногенные катастрофы* расширяются за счет появления новых видов воздействия на окружающую природную среду и человеческое общество. Они будут включать отклонения в социальной и культурной сферах, в области науки и техники. Расширится биотerrorизм, появятся проблемы взаимодействия с роботами, а нано-технологии изменят структуру энергетического баланса планеты, повысив эффективность усвоения солнечной энергии от современных 10% до 50% в будущем.

Спектр техногенных катастроф расширяется за счет экологических катастроф, которые будут возникать по причинам пренебрежения мерами безопасности, халатности персонала предприятий, политических и административных амбиций, алчности, бездумного стремления к экономии средств и к дезинформации или полному утаиванию сведений о катастрофе. В какой степени все эти причины будут развиваться или, наоборот, уменьшаться предсказать трудно и даже невозможно. Поэтому, изучение глобальных процессов необходимо вести с учетом всех факторов функционирования СПО.

2. ОЦЕНКА РИСКА ОТ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

2.1. Критерии оценки опасности природных катастроф

Понятие опасности природных катастроф тесно связано с понятием уязвимости. Согласно Vogel, O'Brien (2004) термин "уязвимость" является в некотором роде нечетким и его использование при оценке последствий при возникновении стрессовых ситуаций в окружающей среде часто приводит к большим неопределенностям. Для характеристики реакций населения и окружающей среды данной территории на внешние воздействия наряду с уязвимостью применяют множество понятий, таких как, устойчивость, адаптируемость, выживаемость и др. (Krapivin, Varotsos, 2007, 2008) Хотя соотношение между этими понятиями остается расплывчатым, все же они отражают, хотя бы на интуитивном и терминологическом уровнях, понятие опасности от природной катастрофы.

Под уязвимостью понимается способность человека или группы людей предвидеть, бороться, противостоять и преодолевать ущерб от природной катастрофы (Kondratyev *et*

al., 2006b). Понятие уязвимости тесно связано с социальными характеристиками данной территории и может определяться как функция таких составляющих экодинамики, как уровни урбанизации и экономического развития, состояние охраны окружающей среды и медицинского обслуживания. Ведь в последние десятилетия явно прослеживается тенденция нарастания экономических потерь за счет урбанизации и изменения климата. Все это говорит о том, что оценка уязвимости природно-антропогенной системы данной территории требует создания многостороннего подхода к расчету риска от природных катастроф, отражающего взаимодействие биофизических и социально-экономических элементов.

События начала 21-го столетия подтверждают необходимость поиска более совершенных технологий оценки уязвимости СПО в целом или отдельных ее элементов, чем простой подсчет экономических потерь. Например, 22 января 2005 г. на среднем западе и северо-востоке США за сутки выпало 50 см снега при ураганном ветре, что привело к отмене сотен авиарейсов и блокированию многих наземных транспортных магистралей. Является ли это событие лишь эпизодом регионального масштаба или оно коррелирует с процессами глобальной экодинамики? К сожалению, данные, доступные для комплексного изучения этих процессов, не позволяют ответить на этот достаточно простой вопрос. Действительно, только в 2003 г. на территории США произошел ряд стихийных бедствий, о масштабности которых заранее не было известно. Укажем лишь на некоторые из них. Так 16 июня 2003 г. В Западной Виргинии выпало 160 мм осадков, что спровоцировало мощное наводнение, которое разрушило более 200 зданий и нанесло ущерб в 23 млн. долларов. Накануне в центре Техаса ураганный ветер со скоростью 135 км/ч за один день вызвал разрушения с ущербом около 90 млн. долларов. 8 августа в штате Флорида торнадо уровня F1 по шкале Fujita при скорости ветра 160 км/ч принес потери свыше 20 млн. долларов. Аналогичный ущерб причинили грозы с ливнями и торнадо, имевшие место 19 августа в Лас Вегасе и 23 сентября в Пенсильвании. Под конец 2003 г. землетрясение 6,5 баллов в штате Каролина привело к потерям, оцененным суммой в 50 млн. долларов. Всего на территории США в 2003 г. зарегистрировано 107 случаев возникновения чрезвычайных событий природного происхождения. В процентном отношении они распределились следующим образом: тропические циклоны - 30%, грозы - 28%, наводнения - 18%, зимние метели - 17%, землетрясения и извержения вулканов - 7%. Аналогичная статистика доступна для анализа только в развитых странах, а поэтому именно этот информационный пробел является большим препятствием для развития эффективной технологии предупреждения катастрофических природных явлений.

Оценки уязвимости сообщества (социальной группы) или ландшафта (экосистемы) возможны при введении некоторой индикационной шкалы. Здесь возможны различные подходы, одним из которых является расчет чувствительности элементов СПО к глобальным изменениям. Такие оценки могут быть получены с помощью соответствующей модели. Примером подобных расчетов можно назвать, например, оценки последствий парникового эффекта, приведенные в работе (Крапивин, Кондратьев, 2002) или описанный Vogel, O'Brien (2004) индекс небезопасности человека, а также показатель уязвимости сельского хозяйства на территории Индии по отношению к изменениям климата. Здесь также следует отметить то обстоятельство, что понятие уязвимости включает наличие средств к существованию населения территории, подвергшейся воздействию природной катастрофы. Этот аспект важен для оценки уязвимости, так как отражает поведение людей в условиях преодоления последствий катастрофы и представляет внутренние механизмы корреляции социальных и физических факторов формирования показателя уязвимости.

Другое измерение уязвимости лежит в плоскости состояния домашнего хозяйства и наличия продовольствия. В этом измерении распространена классификация уязвимости по четырем уровням: слабая, умеренная, высокая и экстремальная. Показатель состояния домашнего хозяйства соотносится к социально-экономическим группам с выделением

различных информационных категорий, затрагивающих сведения о демографии, уровне развития сельского хозяйства, осадках и состоянии рынка. Все это позволило Bohle (2001) построить двух ярусную структуру уязвимости, отражающую взаимодействие политических, экономических и экологических факторов, оценивающих внутреннюю и внешнюю стороны кризиса и конфликта территории в условиях природной катализмы.

Безусловно, наиболее уязвимыми являются территории развивающихся стран, так как потери от природных катастроф в бедных странах помимо прямого материального ущерба и потерю человеческих жизней расстраивают их экономическую структуру и ограничивают темпы их продвижения к устойчивому развитию. Высокая уязвимость развивающихся стран объясняется также наличием высокого риска получения больших потерь от природных катастроф, так как жилища бедных людей не защищены против стихийных бедствий. Кроме того, для развивающейся страны необходимо больше времени, чтобы ликвидировать последствия природной катастрофы.

Понятие «уязвимости» можно использовать для оценки семи категорий угроз, которые формируют безопасность человека:

- экономическая безопасность (гарантированный основной исход) - уязвимость по отношению к глобальным экономическим изменениям;
- продовольственная безопасность (физическая, экономическая и социальная доступность пищи) - уязвимость относительно чрезвычайных событий, сельскохозяйственных изменений и т.п.;
- безопасность здоровья (относительная свобода от заболеваний и инфекций) - уязвимость от болезней;
- безопасность окружающей среды (доступ к сохранению санитарных свойств воды, чистого воздуха и недеградированных наземных систем) - уязвимость от загрязнения и деградации суши;
- персональная безопасность (гарантия от воздействия физического насилия и угрозы) - уязвимость по отношению к конфликтам, природным катаклизмам, надвигающимся "несчастьям" типа СПИДа);
- безопасность сообщества (гарантия культурной интеграции) - уязвимость от культурной глобализации;
- политическая безопасность (сохранность базовых прав человека и свобод) - уязвимость в конфликтах и вопросах войны, как для ученых, так и для политиков.

В связи с такой классификацией возникают три основных вопроса:

1. Какие технологии может предложить современная наука для более точного понимания и оценки современной сложной реальности, в которой существует население Земли?
2. Способна ли современная наука принятия политических решений предложить технологии для более реалистичеких оценок современной действительности в мире и снизить уязвимость?
3. Существуют ли пути концептуализации уязвимости с точки зрения получения выгод и приобретения потерь при назревающих глобальных изменениях?

Ясно, что ответы на эти вопросы можно искать в различных ситуациях, начиная с индивидуума и кончая всей системой "Природа-Общество". Уязвимость будет различна в развитых и развивающихся странах, в городах и сельской местности, в пустыне и горах. Развитием соответствующих методов оценки уязвимости занимается экоинформатика (Крапивин, Кондратьев, 2002). В связи с необходимостью оценки опасности для населения какой-то территории получить ущерб для здоровья, сооружений или имущества в результате изменений параметров окружающей среды применяется термин «экологическая безопасность». Эти изменения могут быть вызваны как естественными, так и антропогенными причинами. В первом случае опасность возникает за счет флуктуаций в природных процессах, связанных с изменением синоптической обстановки, возникновением эпидемии или за счет стихийного бедствия. Во втором случае опасность появляется как реакция природы на действия человека.

В общем случае возникновение экологической опасности на данной территории является следствием выхода параметров среды обитания человека из пределов, где при длительном пребывании живой организм начинает изменяться по направлению не соответствующему естественному процессу эволюции. По существу понятия «экологическая опасность» или «экологическая безопасность» связаны с понятиями устойчивости, живучести и целостности биосферы и ее элементов. Более того, СПО, являясь самоорганизующейся и самоструктурирующейся системой и развиваясь по законам эволюции, создает внутри себя совокупности экологических ниш, степень приемлемости которых для населения данной территории определяется, как правило, национальными критериями (совокупность ПДК, религиозные догмы, национальные традиции и т.п.).

Тем не менее, при рассмотрении перспектив жизнеобитания на Земле необходимо исходить из общечеловеческих критериев оценки уровней деградации окружающей среды, так как с течением времени локальные и региональные изменения в окружающей среде становятся глобальными. Амплитуды этих колебаний определяются механизмами функционирования климатической системы, которые обеспечивают оптимальность изменения ее элементов.

Человечество все больше и больше отклоняется от этой оптимальности в своей стратегии взаимодействия с окружающими его косными, абиотическими и биотическими компонентами природной окружающей среды. Но в тоже время человеческое общество как элемент системы "климат-биосфера" осознанно пытается понять характер крупномасштабных взаимоотношений с природой, направляя на это усилия многих наук и изучая причинно-следственные связи в этой системе. Поскольку структура человеческого общества привязана к разделению мира на государства, то в дальнейшем под элементом социально-экономического компонента СПО подразумевается страна.

Национальная безопасность любой страны в современных условиях должна оцениваться на основе многих критериев военного, экономического, экологического и социального характера. Разработка эффективной методики для объективного анализа проблемы национальной безопасности страны требует привлечения новейших методов сбора и обработки данных о различных сторонах функционирования мировой системы. Такие методы предоставляются ГИМС-технологией. Одним из аспектов национальной безопасности является защита от стремительно нарастающего потока природных катастроф, которые в условиях современного мира могут стать источниками больших социальных потрясений и, в конечном счете, дестабилизирующим фактором устойчивого развития. Например, только для территории России рост числа природных катастроф за последнее десятилетие составил 27,3% (Krapivin, Varotsos, 2007).

Рассмотрим экономико-экологический аспект национальной безопасности. С позиций системного анализа любую страну можно рассматривать как объект системного анализа, функционирующего в пространстве других сложных систем. Взаимодействие этих систем связано с контролируемыми и неконтролируемыми обменами элементами, имеющими экономическую и экологическую категории. Возникает задача поиска оптимальных стратегий для каждой из взаимодействующих систем. При этом необходимо учитывать неоднородный научно-технический уровень этих систем и, следовательно, различие подходов к выбору критерии оценки национальной безопасности. ГИМС-технология предлагает следующий путь решения возникающих при этом задач.

Разрабатывается глобальная модель СПО. Эта модель описывает основные процессы в СПО с их дискретизацией по пространству и времени. Модель опирается на имеющиеся базы данных и информационные пространства. Она вписывается в единую национальную систему экологического мониторинга территории страны и совмещается с аналогичными мировыми и национальными системами, взаимодействие с которыми оказывается возможным. В результате соединения модели СПО, системы сбора данных об окружающей среде и экономических параметрах регионов страны, системы

компьютерного картографирования и информационных средств синтезируется единая национальная система наблюдения и контроля за экономико-экологической безопасностью. Эта система имеет иерархическую структуру информационных каналов с соответствующей иерархией решаемых задач. В частности, она сможет поставлять оперативную информацию в регионы о состоянии экологии и экономики в любой точке планеты, а также обеспечивать информацию о:

- текущих глобальных изменениях окружающей среды;
- ожидаемых изменениях климата и роли происходящих или планируемых в стране изменений природной среды в изменениях климата и биосфера на Земле и в прилегающих регионах;
- состоянии атмосферы, гидросферы и почвенно-растительных формаций на территории страны;
- наличии необходимых данных об экологических, климатических, экономических и демографических параметрах любого региона;
- уровне экологической безопасности на данной территории;
- появлении опасных для человека и окружающей среды явлений;
- тенденциях в изменениях состояния лесов, болот, пастбищ, сельско-хозяйственных посевов, речных и озерных систем и других природных комплексов;
- риске тех или иных мероприятий по изменению окружающей среды.

На национальном уровне система сможет решать задачи (Савин, Бондур, 2000):

- долгосрочного и своевременного планирования и управления хозяйственной деятельностью с учетом ее экологической целесообразности и разработки стратегии рационального природопользования;
- оперативного оповещения и предупреждения о появлении за пределами и внутри территории страны процессов, могущих ухудшить экологическую обстановку и вызвать долговременные изменения природной среды с повышением риска для здоровья населения отдельных регионов;
- идентификации причин нежелательных изменений окружающей среды на отдельных территориях страны;
- оценки последствий для страны и других территорий земного шара реализаций антропогенных проектов;
- выработки неотложных мер по ликвидации причин возникновения экологических катастроф и стихийных бедствий.

Разработка и реализация эффективной технологии оценки экологической безопасности в глобальных масштабах возможны при создании Международного Центра Глобального Геоинформационного Мониторинга (МЦГГМ) (Савин, Бондур, 2000). Создание МЦГГМ позволит осуществить механизмы коэволюции Человека и Природы. Основным механизмом такого объединения будут новые технологии обработки данных, опирающиеся на успехи эволюционной информатики и глобального моделирования. По существу речь идет о реализации подхода к моделированию процессов в условиях неполной априорной информированности об их параметрах и наличии принципиально неустранимых информационных пробелов.

Согласно схеме рис. 2.1, МЦГГМ характеризуется набором следующих функций

- сбор информации от национальных систем мониторинга и международных центров изучения окружающей среды;
- сортировка, первичная обработка и накопление данных о природных процессах;
- формирование базы знаний о процессах в окружающей среде;
- имитация, математическое и физическое моделирование климатических, биосферных, космических, социальных и экономических процессов;
- прогнозирование состояния окружающей среды и формирование постоянно обновляемого банка сценариев антропогенной активности;

- обслуживание запросов от национальных и международных агентств по охране окружающей среды;
- выдача рекомендаций национальным и международным центрам мониторинга окружающей среды.

Показатели, характеризующие ГИМС как базовую подсистему МЦГМ, группируются по тематическим принципам организации ее структуры. Они уточняются в процессе эксплуатации ГИМС и охватывают ключевые характеристики топографии земного шара, синоптической обстановки в энергоактивных зонах, содержания опасных загрязнителей атмосферы в характерных широтных поясах и сообщения о катастрофах. Входом в ГИМС служит множество нерегулярных по пространству и отрывочных во времени данных измерений геофизических, геохимических, экологических, биогеоценотических и синоптических характеристик. Измерения осуществляются в различных диапазонах волн, различной степени точности приборами контактного и дистанционного действия. Согласование получаемых измерений с другими блоками ГИМС осуществляется алгоритмическими процедурами первичной обработки данных. Объем этих данных будет сокращаться в процессе функционирования ГИМС. На входе ГИМС также предусматривается возможность восприятия сигналов от сценариев антропогенного развития изучаемых ситуаций.



Рис.2.1 Концепция единого центра глобального геоинформационного мониторинга.

Модель ГИМС представлена концептуальной схемой рис. 2.2. Взаимосвязь входных и выходных параметров осуществляется через композицию указанных здесь информационных потоков. ГИМС функционирует в адаптивном режиме, и конечный результат системы влияет на входные характеристики ее измерительной части. Математическая начинка адаптивной части ГИМС представлена на рис. 2.3 (Бондур и др., 2009). Здесь все биогеохимические и биогеоценотические процессы описываются системами балансовых уравнений. Однако значительная часть плохо параметризуемых процессов описывается с помощью метода эволюционного моделирования, ориентированного на безформульную параметризацию сильно нестационарных процессов.



Рис.2.2. Концепция адаптивной настройки глобальной модели СПО в условиях геоинформационного мониторинга: ГИМС-технология.

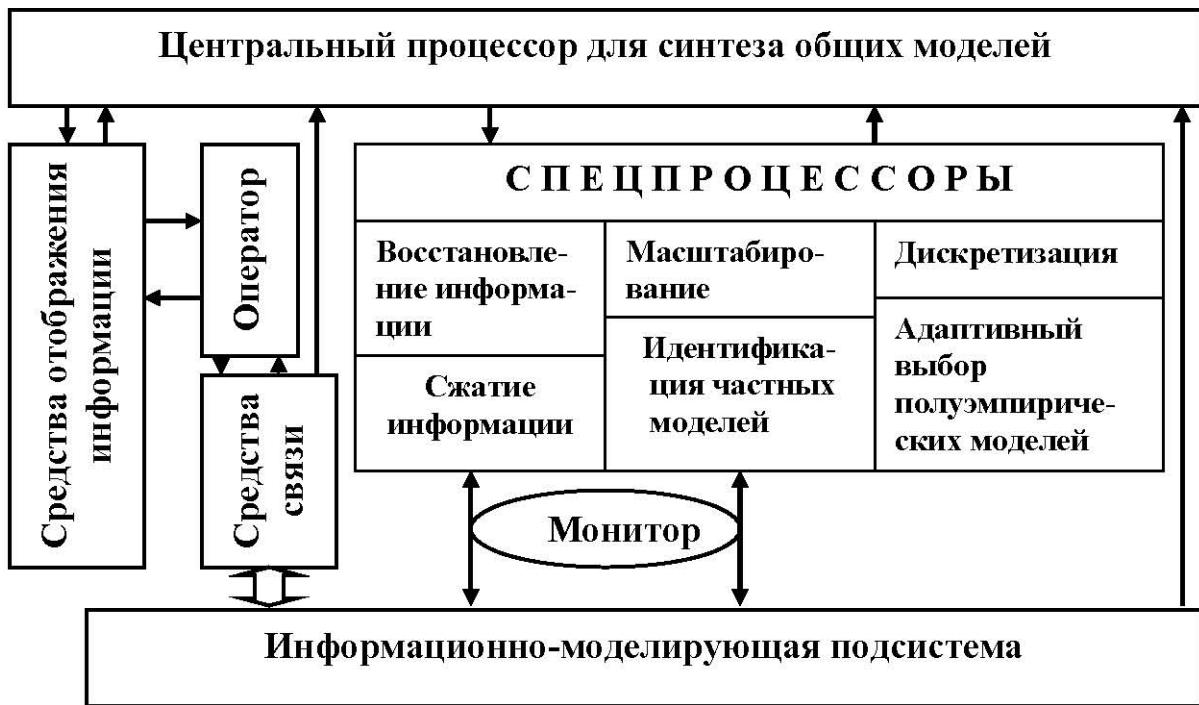


Рис.2.3. Принципиальная структура информационных потоков в системе обработки данных геоинформационного мониторинга с применением технологий эволюционного моделирования.

Социально-экономическая структура на земном шаре может быть разделена на t уровней. Эта структура имеет три главных уровня развития регионов: развитые, развивающиеся и слабо развитые. Реализация проекта МЦГГМ ускорит процесс выравнивания этой структуры, так как будет ускорена оптимизация планирования организационной структуры человеческого общества и будет обеспечена целевая направленность глобальных процессов на пользу человека и без ущерба для природы и, что самое главное, будет способствовать созданию международных механизмов согласованного природопользовательского поведения всего населения Земли. Все человечество будет получать от МЦГГМ преимущество в том смысле, что оно не будет напрасно тратить средства на реализацию экологически неприемлемых проектов и сохранит равновесие с природой. С прогрессом науки и техники эта прибыль будет возрастать, так как безусловен переход на новые виды ресурсов.

Сформулируем задачу оценки экологической безопасности страны на математическом языке с использованием методов теории сложных систем и теории живучести. Обозначим через A национальную систему страны. Система A находится во взаимодействии с другими подобными ей системами, имеющими различное пространственное расположение. Для простоты все другие системы обозначим символом B . Другими словами, все другие страны будем отождествлять в первом приближении с единой системой B . В последующем эту ситуацию можно усложнить путем рассмотрения многих систем, с которыми взаимодействует система A .

Системы A и B имеют цели, структуры и поведения (стратегии). Целью A (B) системы $A(B)$ является ее стремление достичь определенных предпочтительных для нее состояний. Эти цели могут иметь многогранный иерархический характер. Параметрическое представление цели является одной из важных задач. В качестве возможного предложения рассмотрим следующие компоненты цели системы A : A_q - интегральный показатель Q качества окружающей среды всей территории страны не должен быть ниже порога q ; A_L - предельно допустимые концентрации $L(i,j)$ ($j=1, m_i$) веществ не должны нарушаться на j -той части территории страны в среде i ($i=1$ - почва; $i=2$ - вода; $i=3$ - атмосфера); A_e - экономический потенциал страны за время Δt должен увеличиваться на s процентов.

Цель B системы B может иметь отношение к A как антагонистическая, нейтральная или коалиционная. Это отношение определяется видом критериальных функций для обеих сторон. Целесообразность структуры $|A|(|B|)$ и целенаправленность поведения $\bar{A}(\bar{B})$ системы $A(B)$ оценивается эффективностью, с которой система достигает своей цели.

Поведения систем могут способствовать или препятствовать или противодействовать достижению системами своих целей и целей другой системы. В первом случае пару систем можно рассматривать как единую систему с общей целью, взаимодействующую с другими системами. В других случаях будем говорить о взаимоотношении систем. Вообще, спектр взаимодействия природно-антропогенных систем, определенных как квазиоднородные регионы или отдельные страны или их группы, включает богатый ряд факторов, среди которых можно указать на изменение климата, заразные болезни, конфликты, обучение, финансовая нестабильность, коррупция, миграция, неполноценное питание, голод, торговые барьеры и склонность к войне. К сожалению, формализованный учет этих факторов пока затруднен. Поэтому в дальнейшем они имеются в виду при формировании более общих показателей и моделей.

Так как под системами понимаются национальные экологические системы, то естественно ввести некоторые положения о способах их взаимодействия. Такие системы являются открытыми и их взаимодействие можно представить в форме обменов некоторыми ресурсами (финансы, технические средства, природные ресурсы и т.п.). Формализовать это можно вводом некоторого ресурса V , расходуемого системой, и ресурса W , потребляемого системой. В результате между взаимодействующими системами происходит (V,W) - обмен. Ясно, что каждая система желает сделать этот процесс выгодным для себя. Отсюда следует возможность дальнейшей формализации функционирования систем. Другими словами будем считать, что целью каждой системы является наиболее выгодный (V,W) - обмен, т.е. каждая система стремится за минимальное количество V получить возможно большее количество W , которое является функцией структуры и поведения взаимодействующих систем:

$$W = W(V, |A|, |B|, \bar{A}, \bar{B}) = W(A, B) \quad (2.1)$$

В результате взаимодействие систем A и B математически сводится к следующим соотношениям (модели):

$$\underline{W}_a = W_a(V_a, A_0, B_0) = \max_{\{\bar{A}, |A|\}} \min_{\{\bar{B}, |B|\}} W(V_a, A, B), \quad \underline{W}_b = W_b(V_b, A_0, B_0) = \max_{\{\bar{B}, |B|\}} \min_{\{\bar{A}, |A|\}} W(V_b, A, B) \quad (2.2)$$

где A_0 и B_0 - оптимальные системы.

Из приведенных выше соотношений видно, что для определения своей цели каждой системе необходимо решить, что для нее важно: получить ли самый выгодный (V,W) - обмен или помешать это сделать другой системе. При этом системы могут варьировать значения (V,W) -обменов в некоторых пределах $\underline{W}_1 \leq \underline{W}_a \leq \bar{W}_1, \underline{W}_2 \leq \underline{W}_b \leq \bar{W}_2$, где \underline{W}_1 и \underline{W}_2 соответствуют максимально агрессивным состояниям систем, а \bar{W}_1 и \bar{W}_2 – наиболее осторожным.

Если цели систем известны, то имеется вполне определенная ситуация. Если же каждая система или одна из них скрывает свои намерения, то налицо игровая ситуация относительно выбора цели. Обозначим через \underline{A}_i и \underline{B}_j ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$) наборы целей систем A и B соответственно. Цели \underline{A}_1 и \underline{B}_1 состоят в нанесении максимального ущерба другой системе (наибольшая агрессивность), а цели \underline{A}_n и \underline{B}_m соответствуют крайней осторожности обеих систем (наибольшее благоприятствование). Все остальные цели расположены по шкалам $\{i\}$ и $\{j\}$ в порядке перехода от \underline{A}_1 (\underline{B}_1) к \underline{A}_n (\underline{B}_m), включая цели A_q, A_L и A_e . Предполагая, что в ситуации $\{\underline{A}_i, \underline{B}_j\}$ системы получают выигрыши $\underline{W}_a = a_{ij}$ и $\underline{W}_b = b_{ij}$, получим биматричную игру на определение оптимальной цели с платежными матрицами $\|a_{ij}\|$ и $\|b_{ij}\|$. В частном случае при $\underline{W}_a = \underline{W}_b$ игра становится антагонистической.

Заметим, что в общем случае ситуацию следует изучать в вероятностном пространстве, т.е. необходимо говорить о некоторой вероятности $P(V,W)$ достижения каждой системой своей цели. Более того, необходимо рассматривать различные проявления в поведении систем: недежность, информативность, управляемость, обучаемость. Элементы систем должны иметь различные функции и назначения: защитные, жизненно важные.

Дополнительно к уравнениям (V,W) -обмена следует рассматривать динамические соотношения, описывающие зависимость параметров систем от времени. В этом случае математически задача оценки уровня экологической безопасности территории страны сводится к дифференциальной игре.

На национальном уровне, как указывалось выше, имеет место многокритериальность. Государство должно заботиться о соблюдении вполне определенных санитарно-гигиенических и экологических нормативов в заданных климатических ситуациях. Эти ситуации должны прогнозироваться и выступать в виде начальных условий системы оценки экологической безопасности. Качество окружающей среды есть сложная функция температуры T , скорости ветра U , суммарного содержания тяжелых металлов в воде E , воздухе D и почве G ; содержания газа k -го типа ($k = 1, \dots, N$) в атмосфере S_k ; биомассы растительного покрова M и других параметров: $Q = Q(T, M, U, E, D, G, S_1, \dots, S_N)$.

Аналогично обстоит дело с заданием функционального представления зависимостей $L(i,j)$ и других характеристик окружающей среды от природных и антропогенных параметров. Более того, можно свести многие из этих параметров к представлениям в виде функций от инвестиционной политики государства. Например, вводятся размеры инвестиций в борьбу с загрязнениями, в развитие сельского хозяйства, в строительство дорог, в развитие новых технологий и т.д. От этих параметров зависят показатели качества окружающей среды, и задача будет сводиться к поиску оптимальной инвестиционной политики.

Совокупность моделей динамики параметров окружающей среды и указанных выше оптимизационных соотношений определяют задачу синтеза национальной политики в области природоохранной деятельности с учетом соответствующих политик соседних государств и всего мирового сообщества. Безусловно, что разработка региональной стратегии по предотвращению потерь от природных катастроф должна учитывать их статистику с распределением соответствующих потерь. В табл. 2.1 приведен пример возможного оформления результатов многолетнего мониторинга природных катастроф.

Таблица 2.1. Природные катастрофы и распределение их последствий за 1980-2008 гг. За этот период погибло более одного миллиона человек.

Природная катастрофа	Доля среди всех событий, %	Распределение смертельных исходов, %	Распределение экономических потерь, %	Распределение страховых выплат, %
Вулканическая активность	4	2	0,1	0,1
Град	0,5	4	5	4
Жара, засухи	4	4	7	1,2
Землетрясения	27	13	23,8	11
Зимние бури, метели	1	4	6	17
Лавины	0,5	2	0,2	0,05
Лесные пожары	0,5	5	2,9	2,25
Наводнения	24	28	30,7	10
Оползни	2	3,9	0,1	0,03
Сильные морозы	1	3	3	5
Торнадо	0,3	4	2	4,17
Тропические ураганы	11	8	16	28
Ураганы	1,7	18	2	17
Цунами	0,5	0,6	0,2	0,08
Штормовые нагоны	22	0,5	1	0,02

С учетом сказанного первоочередная задача состоит в конкретизации целевых функций и их зависимостей от параметров с учетом внутренней и внешней национальной стратегии в области экологического мониторинга. В окончательном виде математическая задача сводится к краевой задаче для системы дифференциальных уравнений параболического типа. При этом система уравнений опишет динамику загрязнений на территории государства, а краевые условия будут определяться с учетом стратегий поведения прилегающих территорий. Решения краевой задачи будут входить в уравнения (V,W)-обмена, которые окончательно определят экологическую безопасность.

Следует отметить, что изложенный выше подход к развитию технологии оценки опасности природной или инициированной человеком катастрофы содержит достаточно много свободных элементов, требующих уточнения или дальнейшего развития. В частности, проблема оценки опасности является междисциплинарной и ее решение требует совместных усилий специалистов точных наук с юристами, экономистами, психологами и социологами.

В принципе в настоящее время назрела необходимость более широкого понимания термина "катастрофа". Многие исследователи в последнее время обращают внимание на предельные случаи, когда опасность может угрожать большой части или даже всему человечеству. Речь идет о крупных катастрофах, таких как столкновение Земли с большим астероидом, необратимое глобальное изменение климата, распространение смертельных вирусов, непредсказуемые последствия от аварии на ускорителе частиц и т.п. Например, Posner (2005), обсуждая потенциальные опасности для человечества, высказывает мысль о возможном превращении Земли в сверхплотного карлика с диаметром 100м или ее заселение сверхинтеллектуальными нано-роботами, после чего человечество теряет контроль над развитием жизни. К сожалению, подобные исходы как правило рассматриваются как паникерские, фантастические или объект научного вымысла. Однако множество потенциальных событий с вымиранием человечества, безусловно, содержит элементы возможных и мыслимых сценариев и предсказаний. Важно, чтобы психологическое и культурное восприятие элементов этого множества среди публики и политиков соответствовало уровню определенной разумности и понимания.

2.2. Математическое моделирование выживаемости экологических систем

Эффективность и устойчивость сложных систем в неопределенных условиях функционирования оценивается с помощью теории потенциальной эффективности сложных систем. Устойчивость сложной системы во времени связана с постоянством структуры, вещественного состава и энергетического баланса сложной системы, а также с устойчивостью ее реакций на одни и те же воздействия. Нарушение устойчивости системы может быть вызвано физическим и моральным старением ее элементов или силовыми воздействиями со стороны окружающей среды. Воздействия внешней среды могут быть пассивными и активными. Поэтому, кроме естественного старения, элементы системы могут подвергаться вредному воздействию некоторых активных агентов внешней среды, таких как катастрофы. Возникающие при этом задачи изучаются теорией живучести, являющейся разделом теории потенциальной эффективности.

Неопределенность и сложность взаимодействия составляющих СПО в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций может быть предметом анализа теории живучести, так как выживание человека при наступлении катастрофы зависит от принятия превентивных мер для создания защитных средств и возможного воздействия на окружающую среду для предупреждения или даже предотвращения ее возникновения. В этом случае в модели живучести необходимо учитывать неопределенность окружающих условий, разнообразие и неустойчивость "целей" взаимодействующих процессов, многочисленность стратегий поведения. Теория живучести рекомендует при синтезе модели живучести реализовать условное разделение взаимодействующих процессов на два

подмножества, обладающих ограниченными ресурсами для защиты. Одно множество включает элементы, которые определяют структуру общества и его цели. Другое множество условно можно определить как внешняя среда, под которой понимается совокупность явлений, происходящих в живой и неживой природе, и факторов, способных нарушить нормальное функционирование элементов первого множества, а может быть даже и вывести их из строя. Под живучестью системы понимается ее способность активно противостоять воздействию внешних сил, длительное время сохранять с учетом вероятностей состояний системы, при которых она еще остается работоспособной, свои характеристики и обеспечивать выполнение своих функций при определенных методах и условиях ее эксплуатации.

Понятие живучести позволяет расширить понятие надежности, так как оно, кроме естественного старения рабочих элементов системы, учитывает возможность их выхода из строя в результате вредных воздействий некоторых активных агентов внешней среды. Такими агентами со стороны окружающей среды могут выступать природные катастрофы, возникновение которых связано с изменением энергетических процессов и перераспределением вещества в некотором пространстве. Следуя модели (2.1) рассмотрим систему N (Природа), находящуюся во взаимодействии с другой системой H (Человечество). Каждая система во времени может переводить себя в различные состояния. Целью $N(H)$ системы $N(H)$ является ее стремление достичь определенных предпочтительных для нее состояний. Целесообразность структуры $|N|(|H|)$ и целенаправленность поведения $\bar{N}(\bar{H})$ системы $N(H)$ оценивается эффективностью, с которой система достигает цели. Итак, не останавливаясь на философской стороне формулировки цели у системы N , систему $N(H)$ при фиксации ее цели можно характеризовать двумя факторами $N = (|N|, \bar{N}), H = (|H|, \bar{H})$.

Поведения систем могут способствовать или препятствовать достижению системами своих целей и целей другой системы. В первом случае пару систем можно рассматривать как одну систему с общей целью, взаимодействующую со средой. Во втором случае будем говорить о конфликтной ситуации. Если не имеет место ни тот, ни другой случай, то будем говорить об индифферентной ситуации и лишь в этом случае одну систему по отношению к другой будем называть средой. В последнем случае среда может оказывать непреднамеренное мешающее воздействие на систему. Это воздействие обычно называют шумом.

Системы N и H являются открытыми системами. Аналогично (2.1) их взаимодействие описывается уравнениями (V, W) – обмена. В реальной ситуации взаимодействие систем N и H при (V, W) – обмене носит стохастический характер, и поэтому можно говорить лишь о некоторой вероятности $P(V, W)$ достижения каждой системой своей цели. Значение $P(V, W)$ служит показателем эффективности системы. Максимальное значение этой вероятности определяется как предельная эффективность. Ясно, что в развитых странах этот предел выше, чем в бедных странах.

Цель каждой системы представим в виде совокупности четырех сечений:

- R – надежность (устойчивость, стабильность),
- I – информативность (осведомленность в обстановке),
- C – управляемость (внешняя активность),
- L – самоорганизация (в частности, обучение).

В соответствии с этим целостную систему Ξ можно рассматривать в виде совокупности некоторых систем – «сечений» $\Xi = (\Xi R, \Xi I, \Xi C, \Xi L)$, каждое из которых связано только с соответствующей компонентой цели Ξ . Все элементы обеих систем N и H разделим на три класса: рабочие (жизненно важные) n – и h – элементы, защитные Rn – и Rh – элементы и sn – и ch – элементы, предназначенные для воздействия на внешнюю среду. Энергетические возможности систем ограничены запасами жизненных «субстратов»

$\bar{V}_n = \{V_{nj}, j = 1, \dots, n_n\}$ и $\bar{V}_h = \{V_{hj}, j = 1, \dots, n_h\}$, которые расходуются на воспроизведение жизненно важных элементов таким образом, что из $V_{nj}(V_{hj})$ можно воспроизвести $N_j(H_j)$. $n_j(h_j)$ – элементов j -го типа ценностей $n_j(h_j)$. Защитные и активные элементы каждой системы воспроизводятся (генерируются) жизненно важными элементами.

Прежде всего, создаются защитные $E_{Rm}^n(E_{Rm}^h)$ и активные $E_{cm}^n(E_{cm}^h)$ «субстраты», из которых генерируются R- и c – элементы m -го типа, причем выполняются ограничения:

$$\begin{aligned} E_{Rm}^n &= E_{Rm}^n(\bar{V}_n, N_1, \dots, N_{n_n}) = \sum_{j=1}^{n_n} w_{mj}^n f_{jR}^n(V_{nj}, N_j); \\ E_{Rm}^h &= E_{Rm}^h(\bar{V}_h, H_1, \dots, H_{n_h}) = \sum_{j=1}^{n_h} w_{mj}^h f_{jR}^h(V_{hj}, H_j); \\ E_{cm}^n &= E_{cm}^n(\bar{V}_n, N_1, \dots, N_{n_n}) = \sum_{j=1}^{n_n} w'_{mj}^n f_{jc}^n(V_{nj}, N_j); \\ E_{cm}^h &= E_{cm}^h(\bar{V}_h, H_1, \dots, H_{n_h}) = \sum_{j=1}^{n_h} w'_{mj}^h f_{jc}^h(V_{hj}, H_j); \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $w_{mj}^{n(h)}, w'_{mj}^{n(h)}, f^{n(h)}$ - некоторые заданные веса и функции соответственно.

Энергетические запасы (2.3) расходуются для формирования соответствующих R - и c- элементов. Начальные ресурсы $\bar{V}_n = \{V_{nj}, j = 1, \dots, n_n\}$ и $\bar{V}_h = \{V_{hj}, j = 1, \dots, n_h\}$ вследствие своей ограниченности могут воспроизвести либо много малоэффективных элементов, либо мало высокоэффективных элементов. Поэтому естественно предположить, что функции $f^{n(h)}$ при фиксации первого аргумента являются убывающими функциями второго. Смысл этого состоит в том, что "в объединении сила" ("дробление сил невыгодно"). Отсюда видно, что с ростом $N_j(H_j)$ количество защитного $E_{Rm}^{n(h)}$ и активного $E_{cm}^{n(h)}$ запасов энергии уменьшается, а значит, уменьшается количество соответствующих защитных и активных элементов фиксированной эффективности или при том же количестве понижается эффективность. Следовательно, при фиксации количества жизненных "субстратов" имеются определенные критические соотношения между количествами всех элементов, обеспечивающих максимальную живучесть системы.

Например, в США для поддержания трехуровневой системы мониторинга и предупреждения ураганов ежегодно расходуются миллиарды долларов. Ясно, что подключение к этой системе дополнительных ресурсов стран Юго-Восточной Азии позволило бы расширить диапазон ее действия и повысить эффективность. Отсутствие такого расширения и привело к трагедии 26 декабря 2004 г., разыгравшейся в результате мощного цунами.

С формализацией в виде описываемой модели живучести атрибутов системы N связаны нерешенные вопросы в области понимания механизмов регуляции окружающей среды.

Будем считать, что системы N и H в момент начала взаимодействия имеют:

- 1) N_j и H_j жизненно важных элементов типа $j=1, \dots, n_n(n_h)$ и ценностей a_j и b_j соответственно, причем

$$\sum_{j=1}^{n_n} a_j N_j = U_n(0), \quad \sum_{j=1}^{n_h} b_j H_j = U_h(0); \quad (2.4)$$

- 2) r_n и r_h типов защитных элементов по α_m и β_m в m -м типе, причем

$$\sum_{m=1}^{r_n} \alpha_m = U_{R_a}(0), \quad \sum_{m=1}^{r_h} \beta_m = U_{R_h}; \quad (2.5)$$

3) s_n и s_h типов активных агентов по v_m^n и v_m^h в m -м типе, причем

$$\sum_{m=1}^{s_n} v_m^n = D_n(0), \quad \sum_{m=1}^{s_h} v_m^h = D_h(0) \quad (2.6)$$

соответственно.

Процесс преобразования субстрата в реальных системах всегда однозначно связан с иерархичностью их структуры. Форма этого преобразования определяется спецификой системы. Например, в экологических системах происходит передача энергии от одного трофического уровня к другому. Воздействие на трофическую пирамиду экосистемы может привести к ее уничтожению или переходу в другое состояние. Вообще в природе потоки энергии управляются механизмами саморегуляции природных систем, среди которых выступают и природные катастрофы. Их роль проявляется в создании очагов поглощения или выхода энергии в виде землетрясений, испарения и т.п. При этом человек своими действиями (c -элементами) вмешивается в эти природные процессы, а природа со своей стороны влияет на распределение энергии человечеством, часто заставляя его расходовать ее на предотвращение или преодоление стихийных бедствий. Все это взаимодействие происходит на некоторых отрезках времени и состоит во взаимном обмене определенными порциями c -элементов.

Будем считать, что R_n - и R_h - элементы m -го типа при взаимодействии с c_n - и c_h -элементами n -го типа соответственно имеют эффективности d_{mn}^n и d_{mn}^h , а c_n - и c_h -элементы m -го типа при взаимодействии с ω -элементами ($\omega=n, h, R, c$) n -го типа имеют эффективности λ_{mon}^n и λ_{mon}^h соответственно. Системы N и H в каждый момент времени t определяют свое поведение выбором пары чисел:

$$\bar{N}(t) = \{\mu_{mon}^n(t), \sigma_{mon}^n\}, \quad \bar{H}(t) = \{\mu_{mon}^h(t), \sigma_{mon}^h\} \quad (2.7)$$

где $\mu_{mon}^{n(h)}(t)$ и $\sigma_{mon}^{n(h)}(t)$ - порции $R_n(R_h)$ - и $c_n(c_h)$ - элементов m -го типа, направляемых на защиту и уничтожение ω -элементов n -го типа соответственно.

С течением времени порции c_n - и c_h - элементов заполняют системы H и N соответственно, и, таким образом, со временем жизненно важные элементы систем ослабевают, если нет их восстановления. При этом предполагается, что один ω -элемент n -го типа системы N(H) выходит из строя (перестает функционировать) под воздействием одного $c_h(c_n)$ - элемента m -го типа с вероятностью $p_{mon}^{h(n)}(\lambda_{mon}^{h(n)}, \mu_{1on}^{n(h)}, \dots, \mu_{r_{n(h)}}^{n(h)}, d_{1m}^{n(h)}, \dots, d_{r_{n(h)}m}^{n(h)})$.

Для получения количественной оценки характера взаимодействия систем N и H необходимо конкретизировать смысл (V,W)-обменов, к оптимизации которых стремятся обе системы. Будем считать, что живучесть системы определяется наличием в ней жизненно важных элементов. Другими словами, система N(H) в момент t функционирует нормально, если выполняется условие $Q_n(N_1, \dots, N_{n_n}, t) > Q_{n,\min}(t)$; $(Q_h(H_1, \dots, H_{n_h}, t) > Q_{h,\min})$, где Q_n и Q_h - заданные функционалы времени и структур систем N и H соответственно. В частности, можно принять

$$Q_n = \sum_{j=1}^{n_n} a_j N_j(t); \quad Q_{n,\min} = \sum_{j=1}^{n_n} \theta_{nj} a_j N_j(0); \quad Q_h = \sum_{j=1}^{n_h} b_j H_j(t); \quad Q_{h,\min} = \sum_{j=1}^{n_h} \theta_{hj} b_j H_j(0); \quad (2.8)$$

где $0 \leq \theta_{nj}, \theta_{hj} \leq 1$ - параметры, определяемые спецификой систем и требованиями, которые предъявляются к их живучести. Эти параметры характеризуют жизнеспособность систем.

В самом деле, система $N(H)$ в момент t функционирует нормально, если $(1-\theta_{nj}) ((1-\theta_{hj}))$ - я доля $n(h)$ -элементов j -го типа в этот момент находится в функционирующем состоянии.

Процессы (V,W) -обмена каждой системы взаимосвязаны. Поэтому ситуацию взаимодействия систем N и H можно рассматривать как обобщенный конфликт, для описания которого необходимо задание функции выигрыша, вид которой для каждой системы зависит от степени конфликтности ситуации, т.е. находится в зависимости от того, как влияет одна система на выполнимость цели другой системой, а также от состояния обоих систем. Для измерения степени напряженности конфликта может быть предложена некоторая шкала при условии введения понятия целеустремленности принимающего решение. В рассматриваемом случае целеустремленность у каждой системы может быть выражена в виде некоторой фиксированной последовательности состояний, предпочтительных с точки зрения каждой системы. Основой этой последовательности служит величина потерь жизненно важных элементов обоими системами. Ценность этих потерь в интервале времени $[0,T]$ можно выразить в виде

$$\Delta Q_n = \sum_{i=1}^{n_n} a_i [N_i(0) - N_i(T)], \quad \Delta Q_h = \sum_{i=1}^{n_h} b_i [H_i(0) - H_i(T)] \quad (2.9)$$

для систем N и H соответственно. Отсюда видно, что интенсивность конфликта зависит от $\Delta Q = \Delta Q_n + \Delta Q_h$.

2.3. Уровень изменчивости среды обитания живых систем

Природные циклы различных временных масштабов сопровождаются неизбежными разрушительными воздействиями на окружающую среду, которые в принципе могут отбросить современную цивилизацию в ее развитии назад. Конечно, современная цивилизация обладает большой мощностью и знаниями, чтобы успешно противостоять такому исходу возможной глобальной природной катастрофе. Но, тем не менее, существует опасность от ударов крупных метеоритов, мощных извержений вулканов и землетрясений, когда может произойти резкая смена климата и окружающая среда изменится, создав неблагоприятные, а может быть и невозможные, условия для существования живых организмов. Среди множества сценариев развития подобных ситуаций в будущем, по-видимому, следует изучать такие, которые допускают возможность выживания человечества, если оно сможет найти способ противостоять возможным угрозам.

Вопрос о выживании человеческого общества достаточно сложен, чтобы на него дать ответ только на основе какой-либо модели. Здесь важны как философские, так и медицинские аспекты, без понимания которых невозможно определить стратегии и поведения людей. Споры о характере эволюции биосферы, формулировки признаков индивидуальностей и их сообществ, а также попытки определить смысл биосферы делятся многие десятилетия и в основном не дают конструктивного решения о характере эволюции. Ведь наряду с биотическими и физико-химическими процессами здесь необходимо учитывать психологические, этнические, религиозные, языковые, культурные и политические особенности населения данного региона земного шара.

В этих сечениях люди часто находятся в диаметрально противоположных позициях, а, следовательно, для системы H непросто сформулировать цель H . Некоторые люди хотят видеть мир зеленым и не разрушенным антропогенными процессами, а другие стремятся иметь комфортные условия жизни. Компромисс между этими сечениями цели H часто невозможен, а поэтому окончательный выбор делается одной из сторон вопреки желанию другой. Но в этот выбор вмешиваются природные катастрофы, которые могут выступать причиной выработки компромисса между указанными сечениями цели H .

Природные катастрофы были решающим фактором в некоторые периоды истории жизни на Земле. Только в современном мире человек становится одним из решающих

факторов, хотя ему еще не удалось преодолеть многие неприятности, приносимые природными катастрофами, а тем более устраниТЬ сам факт их возникновения. В этом стремлении остается не всегда осознанной роль природных катастроф в изменении социальной структуры и даже в политической жизни.

Природа предоставляет Человеку все меньше возможностей для решения его стратегических задач по улучшению жизни. Она требует от него создания общепланетарной стратегии взаимоотношения с окружающей средой. Другими словами глобальная проблема устойчивого развития СПО с каждым годом встает все более остро. В настоящее время практически не осталось на земном шаре не затронутых человеком территорий, где бы не было городов и населенных пунктов, не действовали бы энергетические системы и не выбрасывались в атмосферу и океаны загрязнения. Нарастание потребности человечества в природных ресурсах вызывает обеспокоенность в их исчерпаемости и возникновении в будущем ситуации, когда все леса будут уничтожены, земельные угодья станут непригодными для земледелия, а водные ресурсы непригодными для использования. Наступит ситуация, когда человечество будет голодать и вымирать от различных эпидемий. С этой точки зрения современное понятие природной катастрофы меняет свой смысл.

Говоря о среде обитания живых существ, следует иметь в виду, что окружающая среда, как сложная система, постоянно изменяется в результате обмена веществ и энергии между ее компонентами. В результате этих изменений происходят нарушения прежних связей между элементами этой системы, что может быть причиной возникновения природных катастроф на территориях, где ранее они не наблюдались. Поэтому уровень взаимоотношения человека и природно-географической среды во многом имеет исторический характер. Ясно, что исторический аспект взаимодействия природы и общества имеет строго географическую привязку и связан со спецификой как природных, так и социально-экономических условий данного региона. Например, ближневосточные страны расположены в зоне засушливого климата и для них характерен отличный от Европы или Америки социальный и культурный образ мышления, что вызывает иное восприятие чрезвычайных природных явлений. Для этого региона нормальными являются ограниченность в водных ресурсах, кочевой образ жизни, стремление к созданию ирригационных систем и т.д. Как результат приспособленность жителей стран Ближнего и Среднего Востока к условиям окружающей среды характеризуется сохранением равновесия между возможностями природной среды и потребностями общества, что было достигнуто за счет установления определенных общественных порядков.

Говоря о соотношении природных и антропогенных процессов в условиях вероятного появления чрезвычайной ситуации в окружающей среде необходимо учитывать, что человек в отличие от животного представляет собой единство естественного и социального начал, а это значит, что его обмен с окружающей средой социально опосредован и осуществляется небиологическими средствами. Поэтому среда обитания человека определяется стратегией его целесообразной деятельности и ее восприятие во многом субъективно. Но основные ресурсы Земли для поддержания жизни в современной ее форме ограничены, а поэтому являются общим достоянием и их изменение не должно осуществляться отдельными регионами.

2.4. Модели живучести экологических систем

Согласно Крапивину (1978) модель живучести экологической системы создается с учетом ее взаимодействия с окружающей средой, в которой могут функционировать другие экологические и антропогенные системы. Для глобальной системы «природа-общество» такое взаимодействие осуществляется между отдельными странами. В целом, выживаемость экологической системы определяется устойчивостью ее функционирования и способностью выдерживать резкие колебания окружающей среды, возникающие по естественным или антропогенным причинам. Другими словами, в этом случае система

должна обладать способностью к реакциям, пропорциональным по величине силе возмущающего воздействия и гасящим эти воздействия. При этом в экосистеме возбуждаются компенсационные (отрицательные) обратные связи, что равноценно выполнению принципа Ле Шателье. При превышении некоторой критической величины воздействия экосистема теряет устойчивость, возникают положительные обратные связи, которые могут привести к её разрушению.

Модель живучести должна отражать взаимодействия системы с окружающей средой с учетом неопределенности, разнообразия и неустойчивости целей и поведений других систем. С практической точки зрения важным является построение и изучение моделей живучести сложных систем, имеющих иерархическую структуру. Иерархичность системы определяется наличием функциональных связей между элементами системы. Характер этих связей зависит от назначения элементов. Одни элементы могут выступать как источники энергии («субстрата»), другие – либо как потребители, либо как сила, реализующая процесс воспроизведения.

Моделирование живучести экологических систем, как подкласса иерархических систем, важно при решении задач рационального использования и воспроизводства ресурсов биосфера, что в последнее время становится все более актуальной проблемой практически во всех регионах нашей планеты.

Впервые вопросы живучести с математических позиций были рассмотрены Ланчестером (Lanchester, 1917). Эти модели полезны для получения качественных результатов и оказываются неэффективными при подходе к ним с прикладных позиций. Уравнения Ланчестера и большинство последующих их модификаций, касающихся вопросов определения потерь двух конфликтующих сторон (типа системы «хищник-жертва»), в значительной степени напоминают аналогичные дифференциальные уравнения, определяющие ход химических реакций или отражающие биологические законы (например, увеличение или уменьшение биологического вида). Это обстоятельство позволило установить общность теорий, истоки которых восходят к моделям Ланчестера и Вольтера.

В качестве примера модели живучести рассмотрим экосистему Перуанского течения. Знаковый ориентированный граф сообщества экосистемы Перуанского течения показан на рис. 2.4.

С учетом этого графа запишем трофическую матрицу сообщества:

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

В матрице A через «0» обозначено отношение нейтралитета, «1» – жертва и «-1» – хищничество. Видно, что матрица A является неразложимой, так как в трофическом графе нельзя выделить группу (или одну) вершин, в которых заканчивались бы стрелки из всех других вершин графа. Следовательно, критерий знак-устойчивости Квирка-Руппера (Свирижев, 1987) не выполняется. В результате выживаемость системы регулируется не только интенсивностью связей в трофическом графе, но и структурными изменениями самой экосистемы. В работе Krapivin (1996) показано, что изменения климата, наблюдаемые в восточном секторе Тихого океана, вызывают резкие пространственные смещения структуры трофического графа экосистемы Перуанского течения. Эти смещения

являются защитной реакцией экосистемы на лимитирования отдельных ее функций, например, в периоды Эль Ниньо.

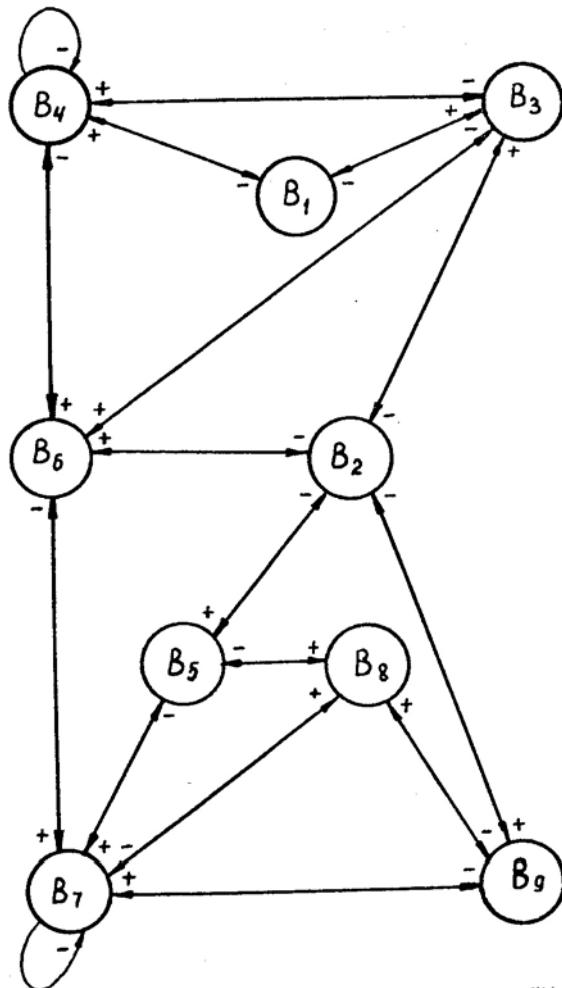


Рис.2.4 Знаковый ориентированный граф сообщества Перуанского течения. Знаки «+» и «-» на концах стрелок указывают на характер отношений между элементами сообщества. Обозначения: B1 – бактериопланктон (кал м-3), B2 – фитопланктон (кал м-3), B3 – фитофаги (кал м-3), B4 – хищный зоопланктон (кал м-3), B5 – промысловый анчоус (кал м-3), B6 – личинки анчоуса (кал м-3), B7 – хищные рыбы (кал м-3), B8 – птицы (шт м-2), B9 – молодь анчоуса (кал м-3).

2.5. Исследование модели живучести экосистем

Рассмотрим экосистему A , в состав которой входят 10 компонент (Виноградов и др., 1975): бактериопланктон (B_1), фитопланктон (B_2), науплии (B_3), фитофаги мелкие (B_4) и крупные (B_5), эврифаги (B_6), хищный зоопланктон – мелкий (B_7) и крупный (B_8), нектон (B_9) и детрит (B_{10}). Для каждого из компонентов экосистемы записываем балансовое уравнение:

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = R_i - H - T_i - M_i - \sum_j C_{ij} R_j, \quad (2.10)$$

где t – время (сут.), B_i – биомасса i -го компонента (ккал/куб.м), R_i – суточная величина рациона i -го компонента (ккал/(сут. куб.м)), H_i – суточная величина неусвоенной пищи (ккал/(сут. куб.м)), T_i – суточная величина потерь на энергетический обмен с окружающей средой (ккал/(сут. куб.м)), M_i – суточные потери биомассы за счет отмирания (ккал/(сут. куб.м)), сумма в правой части указывает на уменьшение биомассы i -го компонента за счет

его потребления другими трофическими уровнями, коэффициент C_{ij} отражает долю i -го компонента в пищевом рационе j -го компонента.

Входом в систему A является солнечный свет E , а на выходе может изыматься конечная продукция η . Граф трофических связей описывается матрицей $| | k_{ij} | |$:

$$| | k_{ij} | | = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{110} \\ k_{21} & k_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{31} & k_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{41} & k_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{51} & k_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{73} & k_{74} & k_{75} & k_{76} & k_{77} & k_{78} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{83} & k_{84} & k_{85} & k_{86} & k_{87} & k_{88} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{94} & k_{95} & k_{96} & k_{97} & k_{98} & k_{99} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Составляющие базового балансового уравнения запишем, следуя работе Крапивина и Кондратьева (2002):

$$\begin{aligned} C_{ij} &= k_{ij} \bar{B}_i / \omega_j, \quad \omega_j = \sum_{s=1}^9 k_{js} \bar{B}_s, \quad M_1 = \max \{0, \mu_1 (B_1 - B'_1)^{r_1}\}, \\ R_j &= k_{j0} B_j [1 - 10^{-\omega_j}] \quad (j = 1, 3, \dots, 9); \quad R_2 = k_{20} [1 - 10^{-k_{22} B_2}] + R'_p, \\ H_1 &= H_2 = 0, \quad H_i = h_i R_i \quad (i = 3, \dots, 9); \quad T_i = t_i B_i \quad (i = 2, \dots, 8); \quad M_3 = \dots = M_8 = 0; \\ T_1 &= t_1 B_1 [1 - 10^{-t_1' B_{10}}], \quad T_9 = t_9 B_9^{t_9'}, \quad M_2 = \max \{0, \mu_2 (B_2 - B'_2)^{r_2}\}, \\ M_9 &= \max \{0, \mu_9 (B_9 - B'_9)^{r_9}\}, \quad R'_p = k'_{20} B_2 [1 - 10^{-k_{21} \bar{B}_1}], \quad \bar{B}_s = \max \{0, B_s - B_s^0\}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где B_s^0 - минимальная биомасса s -го компонента, ниже которой прекращается ее потребление другими трофическими уровнями.

Уравнение для детрита записывается виде:

$$\frac{\partial B_{10}}{\partial t} = M_1 + M_2 + \sum_{s=3}^9 H_s - R_1 + D, \quad (2.13)$$

где D – приток детрита за счет внешней среды.

Значения коэффициентов k_{ij} в трофической матрице определяют эмпирически для конкретной экосистемы. Эта процедура подробно описана Ивлевым (1955) и неоднократно использовалась многими авторами.

Для экосистемы тропической зоны Мирового океана такие оценки были сделаны Виноградовым и др. (1975). Ниже даются усредненные по нескольким публикациям оценки коэффициентов k_{ij} и других параметров в (2.3): $k_{10}=4$, $k_{20}=40$, $k_{30}=1,48$, $k_{40}=0,89$, $k_{50}=0,48$, $k_{60}=0,47$, $k_{70}=0,87$, $k_{80}=0,38$, $k_{90}=0,1683$, $k_{21}=0,2$, $k_{31}=20$, $k_{22}=0,014$, $k_{32}=k_{42}=k_{52}=2$, $k_{63}=k_{64}=k_{73}=k_{74}=k_{77}=k_{84}=k_{85}=k_{86}=k_{87}=k_{88}=0,833$, $k_{9}=0,677$ ($j=4, \dots, 9$), $k_{110}=0,015$, $r_1=r_2=r_9=1$, $t_1=0,75$, $t_2=0,4$, $t_3=0,7$, $t_4=0,46$, $t_5=t_6=0,25$, $t_7=0,52$, $t_8=0,23$, $t_9=0,0673$, $\mu_1=\mu_2=0,013$, $h_2=0,3$, $h_3=0,27$, $h_4=h_5=0,14$, $h_6=0,18$, $h_7=0,08$, $h_9=t'_1=0,2$, $B'_9=500$, $k'_{20}=0,015$, $B'_2=50$.

Как следует из уравнения (2.10) при наступлении ситуации, когда одновременно, начиная с момента времени $t\tau$, наступают условия $B_i(t_\tau) \leq B_i^0$ ($i = 1, \dots, 9$), то все трофические связи в экосистеме обрываются, и начинается процесс отмирания ее

компонентов. В других случаях при частичном выполнении указанных условий степень нарушения жизнедеятельности экосистемы определяется многими обстоятельствами. Поэтому под живучестью экосистемы будем понимать свойство экосистемы сохранять способность к целостному существованию в любой наперед заданный промежуток времени. На математическом языке это означает, что экосистема A существует (живет), если выполняется неравенство:

$$\sum_{i \in A} \frac{B_i(t)}{B_i(0)} \geq \sum_{i \in A} \theta_i, \quad (2.14)$$

где величины $\theta_i \in [0,1]$ являются показателями жизнеспособности экосистемы A . Фактически считается, что экосистема A перестает существовать как единая система, если начиная с некоторого момента времени t_τ первоначальные биомассы всех ее компонентов уменьшаются на $(1-\theta)$ -ю часть. Ясно, что приняв этот критерий живучести для рассматриваемой экосистемы океана и положив $\theta_i = B_i^0 / B_i(0)$, определим функцию живучести:

$$v(t) = \sum_{i=1}^9 B_i(t) / B_i(0) \quad (2.15)$$

Рассмотрим конкретный пример экосистемы зоны апвеллинга с начальными значениями (ккал на кубический метр): $B_1(0)=3,35$, $B_2(0)=5$, $B_3(0)=1,6$, $B_4(0)=0,8$, $B_5(0)=1,05$, $B_6(0)=1,8$, $B_7(0)=1,15$, $B_8(0)=2$, $B_9(0)=0,05$, $B_{10}(0)=124$. При этом эффективная биомасса каждого компонента принимается равной 90% от фактической величины его биомассы ($\theta_i = 0,1$). Также будем считать, что экосистема замкнута (изолирована) относительно перераспределения биомасс по трофическим уровням за счет внешней среды ($D=0$), а также $\mu_9=0$ и $R'_p = 0$.

Расчеты показывают, что в начальный период развития экосистемы из-за малой начальной биомассы потребителей бактериопланктона и фитопланктона происходит достаточно быстрое нарастание функций $B_1(t)$ и $B_2(t)$. Постепенно биомассы бактерий и фитопланктона достигают максимальных значений на 5-е сутки функционирования экосистемы, после чего за счет их выедания развившимися следом за ними других трофических уровней начинается уменьшение биомасс $B_1(t)$ и $B_2(t)$. Примерно через 10 суток наступает момент взаимного лимитирования трофических уровней, что вызывает смещенные по фазе колебания биомасс всех компонентов экосистемы. Влияние свободного хищника – нектона- в первые 90 суток существования системы практически проявляется лишь в вариациях амплитуд колебаний биомасс других трофических уровней. Однако когда биомасса нектона достигает концентрации 300 ккал/(сут. куб.м), начинается общее уменьшение биомасс потребляемых нектоном трофических уровней, а затем и к вымиранию нектона. Поэтому для устойчивого развития экосистемы необходимо изымать биомассу нектона, сохранив ее на указанном уровне.

Различные гипотетические вычислительные эксперименты над моделью экосистемы показывают, что функция $v(t)$ достаточно правдоподобно отражает реакции экосистемы на различные воздействия. Например, полное изъятие какого-либо трофического уровня приводит к длительному нарушению функций экосистемы. Так отсутствие компонента t или s_2 приводит к достаточно хаотическому процессу изменения биомасс других компонентов в течение 5 месяцев, а изъятие эврифаг вызывает разрушение экосистемы. Следовательно, даже простая форма функции живучести $v(t)$ может служить информативным индикатором состояния морской экосистемы.

2.6. Учет факторов случайности в модели живучести экологических систем

Изучим вариант модели живучести, когда во взаимодействии находятся системы A и B . Система A имеет N жизненно-важных элементов (a -элементов) и M защитных элементов (R -элементов). Система B имеет K активных элементов (c -элементов). R - и c -элементы могут находиться относительно друг друга в одном из двух состояний: состоянии контакта (RC -состоянии) и в свободном состоянии (F -состоянии). A -элементы также могут находиться в одном из двух состояний: состоянии функционирования (W -состоянии) и в «неисправном» состоянии (I -состоянии). Будем считать, что система A функционирует нормально, если хотя бы θ -я часть a -элементов находится в W -состоянии. Параметр θ будем называть «уровнем живучести» системы A .

Предположим, что вероятность перехода одного a -элемента из W -состояния в I -состояние (WI -переход) в интервале времени $[t, t+\Delta t]$ при RC -состоянии R - и c -элементов равна $v\Delta t$ (подчинено закону Пуассона). Также допустим, что время, в течение которого сохраняется F -состояние, распределено в соответствии с плотностью вероятности $\varphi(x)$, а время, в течение которого поддерживается RC -состояние, также имеет распределение с плотностью $\psi(y)$. Причем,

$$\varphi(x) = \eta(x) \exp \left[- \int_0^x \eta(u) du \right], \quad \psi(y) = \xi(y) \exp \left[- \int_0^y \xi(v) dv \right] \quad (2.16)$$

Обозначим: $P_n^F(x, t)\Delta t$ - вероятность того, что за время t произойдет n WI -переходов при условии, что время, прошедшее с момента установления F -состояния, лежит в интервале $[x, x+\Delta t]$; $P_n^{RC}(y, t)\Delta t$ - вероятность того, что за время t произойдет n WI -переходов при условии, что время, прошедшее с момента установления RC -состояния, лежит в интервале $[y, y+\Delta t]$.

Связывая вероятности в моменты t и $t+\Delta t$ при $\Delta t \ll 1$, получаем следующие уравнения:

$$\begin{aligned} P_n^F(x + \Delta t, t + \Delta t) &= P_n^F(x, t)[1 - \eta(x)\Delta t], \\ P_n^{RC}(y + \Delta t, t + \Delta t) &= P_n^{RC}(y, t)[1 - \xi(y)\Delta t] \cdot [1 - v\Delta t] + P_n^{RC}(y, t)v\Delta t \end{aligned} \quad (2.17)$$

Функции P_n^F и P_n^{RC} должны, кроме того, удовлетворять ограничениям:

$$P_n^{RC}(y, 0) = 0; \quad P_n^F(x, 0) = \delta(x)\delta_{ni};$$

$$P_n^{RC}(0, t) = \int_0^\infty P_n^F(x, t)\eta(x)dx; \quad P_n^F(0, t) = \int_0^\infty P_n^{RC}(y, t)\xi(y)dy; \quad (2.18)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, δ_{ni} – дельта – функция Кронекера, i – число возможных WI -переходов до момента $t=0$.

Вероятность $P_n(t)$ осуществления n WI -переходов до момента t будет равна:

$$P_n(t) = \int_0^\infty P_n^F(x, t)dx + \int_0^\infty P_n^{RC}(y, t)dy \quad (2.19)$$

Таким образом, задача вычисления вероятности $P_n(t)$ сводится к решению приведенных выше конечно-разностных уравнений или при $\Delta t \rightarrow 0$ получаем:

$$\begin{aligned} \partial P_n^F(x, t)/\partial x + \partial P_n^F(x, t)/\partial t &= -\eta(x)P_n^F(x, t); \\ \partial P_n^{RC}(y, t)/\partial y + \partial P_n^{RC}(y, t)/\partial t &= -[\xi(y) + v]P_n^{RC}(y, t) + vP_{n-1}^{RC}(y, t) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Для решения этих уравнений используем преобразование Лапласа. Сначала найдем преобразование Лапласа от функций φ и ψ :

$$\bar{\varphi}(s) = \int_0^\infty \varphi(x) \exp(-sx) dx, \quad \bar{\psi}(s) = \int_0^\infty \psi(y) \exp(-y) dy \quad (2.21)$$

Затем вычислим следующее выражение:

$$\bar{\Omega}(\alpha, s) = \frac{\alpha^i}{1 - \bar{\varphi}(s)\bar{\psi}(s + \nu - \nu\alpha)} \left[\frac{1 - \bar{\varphi}(s)}{s} + \frac{\bar{\varphi}(s)\{1 - \bar{\psi}(s + \nu - \nu\alpha)\}}{s + \nu - \nu\alpha} \right] \quad (2.22)$$

Функцию $\bar{\Omega}(\alpha, s)$ разложим в ряд по степеням α :

$$\bar{\Omega}(\alpha, s) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{P}_n(s) \alpha^n \quad (2.23)$$

Считая $\bar{P}_n(s)$ изображением функции $P_n(t)$, обратным преобразованием Лапласа находим:

$$P_n(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \bar{P}_n(s) \exp(st) ds, \quad (2.24)$$

где γ - произвольное положительное число.

Вероятность того, что система A до момента t выживает, равна:

$$P_A(t) = \sum_{n=0}^m P_n(t) \quad (2.25)$$

где $m=N(1-\theta)$. В случае «сильно уязвимой» системы ($\theta=1$) имеем $P_A(t)=P_0(t)$. Для $\eta(x)=\eta_0$ и $\xi(y)=\xi_0$ средние продолжительности KC - и F - состояний равны $\bar{y}=\xi_0^{-1}$ и $\bar{x}=\eta_0^{-1}$ соответственно.

Находим:

$$\bar{\varphi}(s) = \eta_0(s + \eta_0)^{-1}, \quad \bar{\psi}(s) = \xi_0(s + \xi_0)^{-1}, \quad (2.26)$$

$$\bar{\Omega}(\alpha, s) = b\alpha_i/a + \sum_{j=0}^{\infty} [ba^{-i-2} - a^{-j-1}(s + \eta_0)^{-1}] \alpha^{1+i+j},$$

$$\bar{P}_n(s) = \begin{cases} b/a & n=i, \\ b/a^{2+j} - a^{-1-j}(s + \eta_0)^{-1} & n=1+i+j \end{cases}$$

где

$$a = \frac{s(\xi_0 + s + \nu) + (s + \nu)\eta_0}{\nu(s + \eta_0)}, \quad b = \frac{\xi_0 + \eta_0 + s + \nu}{\nu(s + \eta_0)}$$

Не нарушая общности в дальнейшем можно полагать $i=0$, так как при $i>0$ вместо N следует рассматривать $N-i$. Итак, для $n \geq 1$ имеем:

$$P_n(t) = (-1)^n \eta_0 \nu^n \frac{(n-1)!}{(n!)^2} \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} (2n-m)! \left[2 \sqrt{\frac{d^2}{4} - r} \right]^{m-2n-1} \times \quad (2.27)$$

$$\{(-1)^m g_m(s_1) - g_m(s_2) + (\xi_0 + \eta_0)[(-1)^m p_m(s_1) - p_m(s_2)]\}$$

где $d=\xi_0+\nu+\eta_0$, $r=\nu\eta_0$, $s_1=d/2+\sqrt{d^2/4-r}$, $Q=(s+\eta_0)^{n-m-1+l}$,

$$s_2 = -d/2 - \sqrt{d^2/4 - r}, \quad \xi_0 + v + \eta_0 \geq 2\sqrt{v\eta_0},$$

$$p_m(s) = \exp(st) \sum_{l=0}^m \binom{m}{l} \frac{(s + \eta_0)^{n-m-1+l}}{(n-m-1+l)!} t^l,$$

$$g_m(s) = \exp(st) \sum_{l=0}^m \binom{m}{l} \frac{(m-l)(n-m-1+l)(s + \eta_0) + s}{(n-m-1+l)!} Qt^l$$

Выживаемость сильно уязвимой системы будет равна:

$$P_0(t) = (d^2 - 4r)^{-1/2} \{ (d + s_1) \exp(s_1 t) - (d + s_2) \exp(s_2 t) \} \quad (2.28)$$

Численные расчеты показывают, что кривая вероятности *WI*-переходов имеет один максимум, который смещается в сторону большего времени и убывает по величине с возрастанием числа таких переходов. Из-за этого в (2.19) всегда можно указать некоторый интервал $T_1 \leq t \leq T_2$, в котором существенными оказываются только несколько слагаемых, что упрощает вычисление P_A . При этом с уменьшением среднего времени *F*-состояния *c*- и *R*-элементов область существенности *n*-го слагаемого в (2.19) сужается.

Легко заметить, что при уменьшении среднего времени *F*-состояния в k раз область существенности слагаемых в (2.19) также сужается примерно в k раз. С увеличением среднего времени *F*-состояния число существенных слагаемых в (2.19) в интервале $[T_1, T_2]$ уменьшается. Также имеет место закономерность: увеличение среднего времени *RC*-состояния приводит к смещению максимума $P_n(t)$ в сторону возрастания t , т.е. максимальная вероятность получения *n* *WI*-переходов в момент t уменьшается с увеличением среднего времени нахождения *a*-элементов в защищенном состоянии.

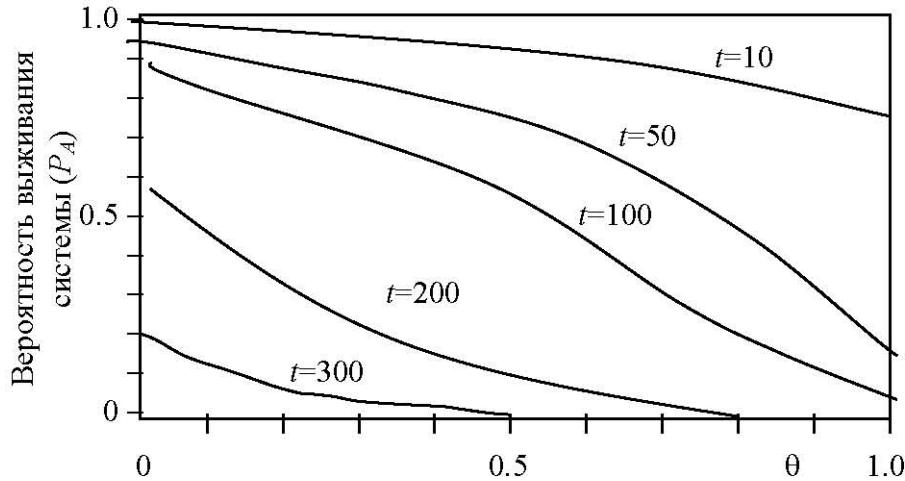


Рис.2.5. Зависимость вероятности выживания системы *A* от уровня ее живучести θ при $N=10$, $v=\xi_0=\eta_0=0,1$. На кривых указаны значения t в условных единицах.

На рис. 2.5 приведены зависимости $P_A(t)$ от значений параметра θ . Видно, что при значениях t , близких к среднему времени контактирующего состояния ($1/\xi_0$) *R*- и *c*-элементов вероятность выживания системы *A* слабо зависит от уровня ее живучести. При $t \gg 1/\xi_0$ эта зависимость становится сильной, что является следствием слабой защищенности *a*-элементов.

В общем случае $\xi_0 = \xi_0(N, M)$, $\eta_0 = \eta_0(N, M)$, $v(K)$. Конкретный вид этих зависимостей и значение θ являются характерным признаком реальной системы. В частности, если *M* и *K* характеризуют стоимость всех *R*- и *c*-элементов, а расход этих ресурсов системами *A* и *B* пропорционален времени *RC*-состояния с коэффициентом m_0 и интенсивность потока *WI*-переходов (с коэффициентом v_0), то в среднем могут быть приняты следующие ограничения:

$$\nu = \frac{\nu_0 K}{T}, \quad \xi_0 = [\min\{T, Mm_0\}]^{-1}, \quad \eta_0 = [\min\{T, T - Mm_0\}]^{-1} \quad (2.29)$$

Взаимодействия системы A и B в общем случае могут иметь противоположные интересы относительно функции $P_A(t)$. В частности, при антагонистической ситуации система A за счет выбора функций φ и ψ будет стремиться максимизировать P_A , а система B путем выбора $v(t)$, будет минимизировать P_A :

$$\min_{\nu} \max_{\varphi, \psi} P_A = \max_{\varphi, \psi} \min_{\nu} P_A \quad (2.30)$$

2.7. Модель живучести биосфера

СПО можно представить как совокупность природы N (Nature) и человеческого общества H (*Homo sapiens*), которые составляют единую планетарную систему. Поэтому их разделение при разработке глобальных или региональных моделей следует считать условным. Системы N и H имеют иерархические структуры $|N|$ и $|H|$, цели \underline{N} и \underline{H} , поведения \bar{N} и \bar{H} соответственно. С математической точки зрения взаимодействие систем N и H можно описать совокупностью соотношений (параметризаций), отражающих в общем случае случайный процесс $\eta(t)$ с неизвестным законом распределения и состоящим из композиции частных процессов взаимоотношения этих систем. Поэтому цели и поведения систем являются функциями показателя η . В самом деле, существуют диапазоны изменения η , в которых поведения систем могут быть антагонистическими, индифферентными и кооперативными. Все человеческое общество адаптировано к некоторой формализованной структуре разделения пространства на страны, группируемые по принципу экономической развитости в первую очередь.

Страна H_i имеет m_i возможных путей достижения цели \underline{H}_i , другими словами она использует ряд стратегий $\{\bar{H}_i^1, \dots, \bar{H}_i^{m_i}\}$. Вес каждой стратегии \bar{H}_i^j задается величиной p_{ij} $\left(\sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} = 1\right)$. Результирующая величина параметра η является функцией указанных характеристик, а в целом ситуация в каждый момент описывается теоретико-игровой моделью.

Объективная оценка динамики природной среды $N = (N_1, N_2)$ возможна при определенных допущениях с помощью моделей биосфера N_1 и климата N_2 . Такие модели разработаны многими авторами и накопленный здесь опыт охватывает примеры точечных, региональных, боксовых, комбинированных и пространственных моделей. Этот опыт позволяет перейти к синтезу глобальной модели нового типа, охватывающей ключевые связи между уровнями иерархии природных и антропогенных процессов.

В общем виде состояние систем H и N можно описать векторами $x_H(t) = \{x_H^1, \dots, x_H^n\}$ и $x_N(t) = \{x_N^1, \dots, x_N^m\}$ соответственно. Совместная траектория этих систем в $n+m$ -мерном пространстве описывается функцией $\eta(t) = F(x_H, x_N)$, вид которой определяется решениями уравнений глобальной модели. Форма F определяется в рамках познания законов коэволюции и поэтому здесь имеется широкое поле для исследований в различных областях знания. Имеющиеся оценки F показывают на взаимосвязь понятий «живучесть» и «устойчивость». Согласно Эшби динамическая система находится в «живом состоянии» в интервале времени (t_a, t_b) , если определяющие ее фазовые координаты находятся в «допустимых пределах» $x_{H,\min}^i \leq x_H^i \leq x_{H,\max}^i; x_{N,\min}^j \leq x_N^j \leq x_{N,\max}^j$. А поскольку системы H и N имеют биологическую основу и ограниченные ресурсы, то одно из указанных граничных условий оказывается лишним, т.е. для компонентов вектора $x = \{x_H, x_N\} = \{x_1, \dots, x_{n+m}\}$

потребовать выполнения условия $x_{min} \leq \eta = \sum_{i=1}^{n+m} x_i$. В эту простую схему укладываются требования как сохранения суммарной энергии в системе, так и разнообразие ее элементов.

Безусловно, понятие живучести биосферы является более емким и содержательным. В системной экологии под этим термином многие авторы рассматривают стабильность и целостность системы, вкладывая в эти термины способность биосферы противостоять внешним воздействиям. Другими словами, живучесть измеряется тенденцией биосферы подавлять большие колебания ее структуры и элементов, возвращая их в равновесное состояние. Таким образом, под живучестью биосферы будем понимать ее способность активно противостоять воздействию внешних факторов, длительное время с учетом вероятностей состояний ее подсистем, при которых она еще поддерживает жизненные пространства, сохранять свои характеристики и обеспечивать выполнение своих функций при определенных отклонениях внешних воздействий. Разработка так называемых стратегий природной и антропогенной компонент биосферы связана с поиском жизнеобеспечивающих технологий (технологий самозащиты), способных помочь человечеству в кризисных ситуациях адаптироваться к экстремальным изменениям внешней среды. Среди этих технологий сейчас можно указать на генетику, роботику, искусственный интеллект и нанотехнологию. Одной из стратегий выживания человечества в условиях крупных природных катастроф является создание адаптированных к опасности транспортных систем, инженерных сооружений, систем защиты водных ресурсов, роботоподобных механизмов для спасательных и восстановительных операций и т.д. Например, существующие транспортные магистрали в зонах возможного возникновения цунами не могут обеспечить оперативной эвакуации населения в безопасные районы. Ясно, что для этих целей в прибрежных зонах необходимы воздушные, подземные или подводные пути спасения людей. Аналогично в зонах чрезвычайных природных явлений, типа наводнений, цунами или землетрясения, необходимо создавать системы защиты ресурсов питьевой воды или продовольствия. Альтернативное и очевидное решение многих из этих проблем видится в построении защитных дамб, которые смогут противостоять цунами, лавовым и водным потокам, защищая население. С этой целью, например, в США в 1998 г. создана федеральная служба FEMA (Federal Emergency Management Agency), задачей которой и является разработка защитных средств и сооружений, позволяющих предотвратить возникновения чрезвычайных ситуаций в регионах, где вероятность их высока. Ясно, что всему человечеству пора задуматься об этих проблемах. Достигнутый за последние 5 тыс. лет прогресс цивилизации может быть уничтожен случайной метеоритной бурей, наступлением ледникового периода, всемирным затоплением суши или поворотом Гольфстрима на юг. Все возможные здесь сценарии, даже имеющие ничтожную вероятность, должны быть изучены в этом столетии. Ведь человечество не может пойти по пути остановки дальнейшего прогресса, оно обязано использовать достижения космонавтики, чтобы выйти на новые этапы использования ресурсов солнечной системы взамен истощающихся ресурсов нашей планеты.

2.8. Показатели эффективности управления риском от природных катастроф

2.8.1. Суть проблемы

С развитием цивилизации все более актуальной становится проблема прогнозирования масштабности ожидаемых изменений климата и связанного с ним изменения среды обитания человека. В первую очередь речь идет о возникновении и распространении нежелательных природных явлений, приводящих к гибели живых существ и причиняющих человеку масштабные экономические ущербы. Такие явления получили название природных катастроф. Такие природные катастрофы, как наводнения, засухи, ураганы, штормы, торнадо, цунами, извержения вулканов, оползни, обвалы, сели,

снежные лавины, землетрясения, лесные пожары, пылевые бури, сильные морозы, жара, эпидемии, нашествия саранчи и многие другие природные явления в значительной степени имеют антропогенный характер.

Известно, что в историческом плане природные аномалии различного пространственного и временного масштабов играли определенную роль в эволюции природы, вызывая и активизируя механизмы регуляции природных систем. С развитием промышленности и возрастанием плотности населения эти механизмы претерпели значительные изменения и приобрели угрожающий жизни характер. Это в первую очередь связано с нарастанием и распространением амплитуды антропогенных возмущений в окружающей среде.

Показатели потерь при возникновении чрезвычайных природных явлений во многом зависят от готовности территории к сокращению риска потерь и существенно изменяются во времени. Наибольшие потери вызывают наводнения и ураганы. Неоднородно также распределение катастроф и в пространстве. В целом процентное распределение природных катастроф по их типам и континентам характеризуется следующими показателями: тропические штормы - 32%, наводнения - 32%, землетрясения - 12%, засухи 10% и на долю других приходится 14%; Азия - 38%, Америка - 26%, Африка - 14%, Европа - 14% и Oceania - 8%.

Природные катастрофы всегда выступали как регулятор процессов эволюции. Но усиление роли человека в их возникновении поставило вопрос о сохранении стабилизирующей роли этого регулятора в будущем. Поэтому восстановление уже подвергшейся существенным возмущающим воздействиям биосферы и поддержание ее в состоянии, обеспечивающем устойчивое развитие, должно стать в настоящее время главной целью человечества.

2.8.2 Роль природных катастроф в жизни человека

Понятие масштабности природных катастроф включает географические, пространственные, временные, экологические, экономические и человеческие факторы, каждый из которых имеет специфическую шкалу. Природные катастрофы в общепринятом определении, безусловно, делятся на категории. К крупным масштабным катастрофам относятся явления в окружающей среде, приводящие к гибели тысяч людей и разрушению жилищ с существенным для данного региона экономическим ущербом. Отсюда, конечно, следует, что шкала масштабности природных катастроф зависит от уровня экономического развития региона, определяющего степень защищенности населения от катастрофических природных явлений. Поэтому изучение феноменов, связанных с природными катастрофами, должно сопровождаться анализом уровня бедности населения данного региона.

Результаты исследований, накопленные за последние 25 лет, показывают, что зависимость потерь в слабо развитых странах от природных катастроф существенно выше, чем в экономически развитых регионах. Если учесть, что за последнее десятилетие число и масштабность природных катастроф возросли примерно в 5 раз, а их опасность – в 9 раз, то становится ясным, какие опасности ожидают население этих стран в ближайшем будущем. Поэтому прогноз и предупреждение кризисных явлений в целом по земному шару должно быть предметом озабоченности всех стран, независимо от их экономического развития.

Объективно развитие и масштабы опасного природного явления зависят от условий природного фона, который может препятствовать или благоприятствовать распространению явления и, следовательно, ослаблять или усиливать его воздействие на окружающую среду. Масштабность жертв среди населения зависит от уровня развития общества, который проявляется в степени разработанности системы прогнозирования, предупреждения и предотвращения возможных природных катастроф. Фактически речь идет о формировании множества факторов, которые могут рассматриваться как природные и социальные предвестники природной катастрофы.

Масштабная оценка природной катастрофы зависит от реакции человека на стихийное бедствие. Например, опасность тропического циклона определяется совокупным действием всех его элементов - ветра, дождя, штормовых нагонов и волн. Скорость ветра в тропическом циклоне может превышать 250 км/ч, занимая полосу шириной 40-800 км. При таком ветре рушатся строения, выходят из строя коммуникации и уничтожается растительность. В результате тропический циклон может вызывать гибель людей или наносить им телесные повреждения. Во время тропического циклона может выпасть до 2500 мм осадков, результатом чего являются наводнения. Важным фактором служит штормовой нагон - это подъем морских вод выше среднего уровня океана до 7 м и более, что приводит к быстрому затоплению низких участков побережья. Наконец, сочетание ветра и штормового нагона приводит к распространению высоких волн, которые уничтожают пляжи, сельскохозяйственные земли, постройки и здания в прибрежной зоне. Само тело циклона движется обычно со скоростью 24 км/ч возрастающей до 80 км/ч по мере удаления циклона от места возникновения. Сопровождающие его гигантские волны обладают большой разрушительной силой.

Категория масштабности природных катастроф предполагает в первую очередь предсказание экологических последствий природных катастроф, которые могут проявляться, постепенно нарастая, через десятилетия в виде снижения продуктивности экосистем, изменения структуры водного баланса территории и нарушения жизненно важных параметров окружающей среды. Другими словами, при развитии технологии оценки масштабности природных катастроф необходимо учитывать целый комплекс критериев: медико-биологических, экономических, социальных, ботанических, почвенных, зоологических и геодинамических. Важным элементом этой технологии является классификационное ранжирование природных катастроф и привлечение знаний из различных наук, особенно обладающих перспективными технологиями будущего применения. Одним из актуальных вопросов, возникающих на рубеже грядущих изменений окружающей среды, является понимание роли изменения климата, например, в процессах генетической модификации. Существенным является также выявление корреляций между изменениями окружающей среды и техническими, экономическими и политическими откликами на эти изменения.

2.8.3. Природные катастрофы как элемент глобальной эволюции

В течение почти четырех миллиардов лет живые существа изменяли химию планеты и климат и, возможно, что именно это обусловило обитаемость планеты. Однако, с другой стороны, современный мир может быть обитаемым только потому, что современные организмы эволюционировали в прошлом в согласии с происходившими изменениями геологических и биологических условий. Среди всех регулирующих окружающую среду процессов природные катастрофы занимали собственную нишу и играли определенную роль в эволюции биосферы. Однако современный период характеризуется тенденцией к нарастанию антропогенно обусловленных природных катастроф, таких как наводнения, лесные и торфяные пожары, обезлесивание, опустынивание и появление эпидемий, что изменяет характер природных обратных связей и, следовательно, меняет роль природных катастроф.

Регулирующая роль природных катастроф, как уже отмечалось в главе 1, проявляется через формирование зоны апвеллингов в Мировом океане при прохождении тропических ураганов, изменение потоков и запасов углерода при природных пожарах. Землетрясения, извержения вулканов, торнадо и другие природные аномальные процессы воздействуют на атмосферу и гидросферу, изменяя биогеохимические круговороты в масштабах от локального до глобального.

Анализ складывающейся в современную эпоху тенденции во взаимодействии человеческого общества с окружающей средой показывает, что наиболее характерными и широко распространившимися за последние десятилетия 20-го столетия процессами

являются интенсивное сведение лесов и опустынивание. Экологические последствия этих процессов включают ухудшение условий жизни для населения и нарушение стабилизирующей роли растительности в энергетическом обмене планеты с космосом. Наблюдается повсеместное уменьшение разнообразия дикой природы. Поэтому при рассмотрении перспектив жизнеобитания на Земле необходимо исходить из общечеловеческих критериев оценки уровней деградации окружающей среды, так как с течением времени локальные и региональные изменения в окружающей среде переходят в глобальные. Амплитуды этих изменений определяются механизмами функционирования NSS, которые обеспечивают оптимальность изменения ее элементов. Человечество все больше и больше отклоняется от этой оптимальности в своей стратегии взаимодействия с окружающими его косными, абиотическими и биотическими компонентами природной окружающей среды. Но в тоже время человеческое общество осознанно пытается понять характер крупно-масштабных взаимоотношений с природой, направляя на это усилия многих наук и изучая причинно-следственные связи в этой системе.

В частности, одной из актуальных проблем в настоящее время является оценка облика планеты при изменении лесных массивов. Оказывается, что достаточно информативным показателем такой изменчивости является индикатор биосложности, определяемый как сумма всех энергетических связей между различными типами экосистем биосфера. Он показывает, что дальнейшее сведение диких лесов может резко снизить биологическое разнообразие и изменить альbedo на большой территории, что приведет к значительному изменению глобального климата. При сокращении площади диких лесов на 10% к 2050 г. уменьшится биоразнообразие на 18% и к 2100 г. концентрация CO₂ в атмосфере повысится на 44%, а такое же расширение этой площади, наоборот, повысит биоразнообразие на 32% и снизит концентрацию CO₂ на 15%.

Одной из неотъемлемых составляющих жизни нашей планеты является вулканическая активность. Действительно, за долгую геологическую историю материки то объединялись, то распадались. Установлено, что примерно 2.5 млрд. лет назад было двадцать континентов, а в раннем протерозое (2 млрд. лет) их было всего тринадцать. Предполагается, что через 1.5 млрд. лет Австралийский, Американский, Африканский и Евразийский континенты вновь соединятся с Антарктидой в единый суперконтинент. При этом, безусловно, будут изменяться мощные вулканические пояса, проходящие по окраинам континентов. Эти, казалось бы медленные процессы, нельзя не принимать в расчет при изучении и оценке современных тенденций в изменении экологической обстановки на Земле. Процессы усиления глубинной дегазации и нарастания глобальных катастроф характеризуются синхронностью. Такие, например, явления как El Niño и образование озоновых дыр во многом зависят от интенсивности поступления свободного водорода из глубин Земли в атмосферу, а на колебания в концентрации атмосферного углекислого газа влияют выбросы метана в зонах дегазации.

О том, как могут развиваться события в будущем можно судить по тенденциям развития экологической обстановки в зоне влияния Аральского моря. Об этом написано множество работ и выдвинуто большое количество сценариев, но ясно одно, что продолжение сложившейся стратегии воздействия на гидрологический режим этой зоны приведет в ближайшие десятилетия к опустыниванию и засолению огромных территорий Средней Азии. Чтобы оценить масштабы бедствия необходимо учитывать, что вариации распределения атмосферных осадков на обширных территориях от степей Ставрополья и Калмыкии до горных массивов Памира и Тянь-Шаня во многом предопределются крупномасштабными пространственно-временными изменениями потоков атмосферной влаги с акваторий Каспийского и Аральского морей, залива Кара-Богаз-Гол (КБГ), крупных водохранилищ и накопителей коллекторно-дренажных стоков, солончаков и других типовых испарителей поверхностных и грунтовых вод на территории Средней Азии.

С позиций экологической комфортности населения и перспектив многопланового развития прикаспийского и среднеазиатского регионов наиболее благоприятными были

1950-60 гг. Уровень Каспия колебался с -28 до -28,5 м относительно уровня Мирового океана, его акватория занимала от 370 до 375 км²/год. По имеющимся оценкам в 1994 г. площадь зеркала Каспия достигла 420 км² с тенденцией к увеличению, а объем испарившейся воды превысил уровень 1960 г. почти на 50 км³ уг⁻¹. Более половины этого количества приходится на северную мелководную часть моря. Ожидается, что при возросшем уровне Каспия (3 м с 1978 г.) могут возникнуть нагонные процессы, волны от которых будут проникать на десятки километров от береговой линии, снижая глубину залегания минерализованных грунтовых вод, разрушая защитные сооружения, смывая в море вредные отходы и ядовитую (типа серы) продукцию предприятий по добыче и переработке углеводородного сырья.

Применяя модельный подход с анализу водного баланса Аральского региона можно рассмотреть различные гипотетические ситуации по воздействию на водный баланс территории с целью поиска способов его позитивного изменения с переводом из современного неудовлетворительного состояния в стабильный и приемлемый по народно-хозяйственным и гидрометеорологическим критериям режим функционирования. Одним из путей выхода из создавшейся критической ситуации является сокращение объемов вод, забираемых на орошение. Ясно, что ликвидировать Каракумский канал невозможно, так как с ним связаны многие сельско-хозяйственные районы Средней Азии. Тем не менее, правительства Казахстана и Узбекистана обсуждают возможность частичного сокращения хлопковых плантаций, с тем, чтобы освободившиеся объемы воды вернуть в Аральское море.

Поиски других путей предотвращения экологической катастрофы в Средней Азии приводили к различным сценариям, среди которых была переброска части вод сибирских рек, отвергнутая многими учеными. Рассматривается также более безопасный сценарий, состоящий в искусственном обводнении за счет объемов каспийской воды участков солончаков и впадин на восточном побережье Каспийского моря, имеющих более низкий по сравнению с морем уровень (- 25,7 м). К таким элементам прибрежного ландшафта относятся: "Lifeless Kultuk" (- 27 м), "Kaidok" (- 31 м), "Kara-Bogaz-Gol Gulf" (- 32 м), "Karagie" (- 132 м), "Kaundy" (- 57 м), "Karin Arik" (- 31 м), "Charala Sor" (-30 м) и др. Происходит усиление потоков испарившейся влаги на 0,2 км³/сут, которые частично с учетом розы ветров переносятся в Туранскую низменность и далее к истокам рек Сырдарьи и Амударьи. Вклад избыточной атмосферной влаги с Каспия в увеличение речного стока в Аральское море может дать около 40 км³/год. При сохранении средней статистической розы ветров между Каспийским и Аральским морями последнее может вернуться в состояние 1960 г. через 12-15 лет.

После трагедии в Азии, произошедшей по причине землетрясения 26 декабря 2004 г. мощностью 9 баллов по шкале Рихтера в районе северо-западного окончания острова Суматра, вопрос о прогнозировании чрезвычайных природных явлений резко обострился. Ясно, что современная геофизическая наука может в основном лишь комментировать причины землетрясений и указывать на различные гипотезы, пытаясь объяснить их подвижками в земной коре.

Пожалуй, самой сложной задачей современной науки является именно прогнозирование землетрясений. Несмотря на наличие специализированных центров, фиксирующих ничтожные колебания земной коры, успехов научного сообщества в изучении закономерностей развития Земли как планеты пока мало. Тем не менее, определенные успехи в прогнозировании других типов природных катастроф имеются благодаря развитию теории климата и глобальной экодинамики. Но все оценки и прогнозы возможны лишь в условиях определенных сценариев климата и стратегий развития человечества. Поэтому важно, чтобы эти сценарии формировались на основе учета предистории развития СПО.

Одним из возможных подходов к прогнозированию землетрясений и извержений вулканов является использование статистики этих природных катастроф в качестве

входной информации недавно развитой технологии эволюционного моделирования. Прогнозирование случайных числовых рядов с помощью метода эволюционного моделирования позволяет получать оценки времени появления следующего события с некоторой вероятностью. В результате применение такого подхода дает следующие оценки. В ближайшие 20 лет следует ожидать в среднем ежегодно 2-3 землетрясения мощностью более 7 баллов и 4-5 землетрясений от 5 до 7 баллов по шкале Рихтера. Что касается извержения вулканов, то следует ожидать 5 крупных событий до 2020 г.

Одним из возможных прогнозов, которые представляют интерес, является оценка изменчивости компонентов глобального водного баланса. Приняв за основу сценарий, предусматривающий рост численности населения к 2100 г. до 11 млрд. чел., получаем, что к 2020 г. будут наблюдаться повышенные нормы осадков на северо-западе Европы, что станет причиной сокращения потока атмосферной влаги с европейского континента на Америку примерно на $400 \text{ km}^3\text{day}^{-1}$. В остальных регионах изменения влагооборота будут колебаться в пределах $\pm 7\%$ с постепенным нарастанием амплитуды к 2100 г. В результате к концу столетия возрастанием осадков будут характеризоваться районы тихоокеанского побережья США, северо-востока Индии, юго-запада Китая, а зона высоких осадков в Европе расширится на север. Следовательно, наводнения в этих регионах станут более частыми. Одновременно с этим уменьшится количество осадков на восточном побережье Северной Америки, в странах Средней Азии и Ближнего Востока, а также изменится режим контрастности смены дождливого и сухого сезонов в Юго-Восточной Азии. Для Европейского континента отрицательным моментом будет заметное снижение осадков в Греции, Италии и на Кавказе. В центральной Европе режим осадков изменится не более чем на 3%.

2.9. Социальное и человеческое измерение риска

В современном мире влияние природных катастроф на социальные, экономические и политические процессы приобрело глобальные масштабы. Это выражается не столько в международной реакции на произошедшее событие, сколько в изменении в мышлении и оценке последствий катастрофы. При рассмотрении последствий катастрофы обычно анализируются технократические парадигмы и оцениваются просчеты в проектировании различных подсистем защиты населения, а также изучаются взаимозависимости и взаимосвязи в инфраструктурах систем контроля и предупреждения о чрезвычайных ситуациях.

Деятельность таких систем во всех странах направлена на снижение риска жизнедеятельности общества, повышение его социально-политической устойчивости и повышение мобильности при угрозах возникновения природной катастрофы. При этом должна быть обеспечена устойчивая обратная связь между обществом и этими системами, что является одной из гарантий снижения риска больших человеческих и экономических потерь.

Малинецкий (2002) по этому поводу пишет о том, какими должны быть философия риска и субъективная и объективная оценка риска. Среди возникающих проблем он указывает на необходимость изучения следующих процессов и анализа еще не оцененных взаимосвязей:

- Чувствительность сложной системы к внешним воздействиям в окрестности точки бифуркации.
- Проблемы, связанные с необходимостью анализа разномасштабных факторов и процессов, относящихся к различным уровням организации как фактор риска многоагентных систем.
- Действия человека и коллектива в чрезвычайной и кризисной ситуации. Субъективные вероятности. Сравнительные опасности различных технологий и их субъективное

восприятие. Чему и как должны учить катастрофы. Понятие о субъективных пространствах и восприятии опасности. Парадокс комитетов.

- Приемлемый, допустимый, предельно допустимый уровень риска.
- Проблема управления рисками природных и техногенных катастроф на государственном уровне.

Безусловно, риск возникает в социальной среде. Можно также говорить о социально-культурной интерпретации риска. Поэтому риск может быть определен как систематическое взаимодействие общества с угрозами и опасностями, индуцируемыми и производимыми процессом модернизации как таковым. Риски, в отличие от опасностей прошлых эпох, являются следствием угрожающей силы модернизации СПО и порождаемых ее чувств неуверенности и страха перед грядущими катастрофами.

В конечном счете, речь идет о разработке концепции социально-экономических аспектов глобальной экодинамики. Перечислим определяемые программой CCSP ключевые направления разработок в этом направлении:

- Каковы уровень, взаимосвязи и значение «человеческого измерения» (социально-экономических факторов) в развитии общества и его роль в глобальных изменениях окружающей среды?
- Каковы современные и возможные в будущем воздействия изменчивости глобальной окружающей среды на хозяйственное развитие, какие факторы определяют способность общества реагировать на происходящие изменения, каковы возможности обеспечения устойчивого развития и ослабления чувствительности общества к воздействиям?
- Каковы возможные методы принятия решений в интересах устойчивого развития в условиях сложности системы «природа – общество» и высокого уровня неопределенностей относительно изменчивости глобальной окружающей среды?
- Каковы возможные воздействия изменений глобальной окружающей среды на здоровье человека; какая информация относительно экодинамики и социально-экономических факторов необходима для оценки соответствующих куммулятивных рисков для здоровья?

Связанные с ответами на эти вопросы наиболее существенные направления разработок включают, в частности, перечисленные далее.

1. Региональные проблемы экодинамики (Krapivin, Varotsos, 2007).

В этой связи первостепенное значение имеют исследования проблем энергообеспечения, восстановления экосистем, здоровья человека и таких особых явлений как засухи и лесные пожары на локальном и региональном уровнях. Решающую роль призвана сыграть в этой связи интеграция физических, химических и биологических наук с учетом соответствующих социально-экономических аспектов, что обеспечит принятие адекватных решений, касающихся экологической политики. Иллюстрацией возможных подходов к решению такого рода задач могут служить исследования зависимости лесных пожаров от условий климата, а основной целью является прогноз антропогенно обусловленных лесных пожаров.

2. Анализ экономической эффективности (Krapivin, Varotsos, 2008).

Сложность количественных оценок экономической эффективности той или иной экологической политики обусловлена неоднозначностью выбора подобной политики с учетом тех или иных приоритетов. Важное значение имеет в этом контексте применение имитационных моделей экодинамики, в особенности моделей изменения запасов углерода на суше с целью оценок реакции запасов углерода в растительности и почвах на специфику землепользования и изменения характеристик поверхности суши, на вариации содержания CO₂ в атмосфере и на климат. Решение такого рода вопросов обеспечит более надежное предсказание глобальных «траекторий» выбросов CO₂ в атмосферу.

3. Возможные последствия глобальных изменений климата для лесного и сельского хозяйства (Fisher *et al.*, 2002).

Анализ такого рода последствий с использованием различных сценариев возможных изменений глобального климата привел к выводу, что в случае нескольких сценариев воздействия на лесное и сельское хозяйство в ряде стран окажутся экономически благоприятными. Отчасти это связано с ростом продуктивности лесов (при увеличении концентрации CO₂), а также обусловлено способностью лесов адаптироваться к изменениям климата. Что касается сельского хозяйства, то, согласно имеющимся прогностическим оценкам на период до 2060 г., положительное воздействие процесса глобального потепления на сельское хозяйство все же окажется менее экономически благоприятным, чем это следует из оценок, полученных ранее. Тем не менее, повышение температуры, изменение режима осадков, пополнение речного стока за счет таяния горных ледников могут привести к увеличению продуктивности сельского хозяйства в некоторых регионах. Эти прогнозы и надежды позволили прогнозировать снижение количества голодающих к 2015 г. на 50% по сравнению с 1990 г. (FAO, 1999, 2006).

4. Влияние солнечной УФ радиации на здоровье (Кондратьев и др., 2004а,б).

В этом направлении ведутся интенсивные разработки с целью изучения влияния спада уровня биологически активной UV солнечной радиации, обусловленного уменьшением общего содержания озона в атмосфере, на развитие рака кожи и катаркты.

Запланированные разработки включают следующие направления:

- создание центров, ответственных за принятие решений в условиях неопределенностей (DMUU), которые должны функционировать в период до 2008 г.;
- домашнее энергопотребление и его перспективы с учетом существующих демографических трендов;
- анализ эффективности сезонных прогнозов погоды и перспектив предсказания межгодовой изменчивости климата;
- обоснование возможностей адаптации хозяйственной деятельности к изменениям климата;
- прогнозирование возможного повышения уровня океана и обоснование необходимых в связи с этим мер;
- оценки последствий глобальных изменений в контексте проблем риска и множественности факторов стресса;
- изменчивость климата и здоровье человека; UV солнечная радиация и здоровье.

При всей содержательности разработанной в США программы исследований климата (Morgan *et al.*, 2009) следует отметить, что эта программа:

- все еще не обладает необходимой системностью (прежде всего в том смысле, что в программе отсутствует последовательный подход к решению проблем климата как интерактивной части проблематики глобальных изменений);
- не содержит обоснования единого подхода к решению задач глобальной системы наблюдений (программа ESSP партнерства в комплексном изучении системы Земли не решает такого рода объединительной задачи);
- уделяет недостаточное внимание палеоклиматической проблематике. Эти три общих соображения определяют необходимые перспективы дальнейших программных разработок.

Эти три общих соображения определяют необходимые перспективы дальнейших программных разработок. Ясно, что уровень восприятия риска изменяется с совершенствованием и развитием СПО, приводящим все к новым факторам риска. Но в тоже время возрастает разнообразие объектов защиты человека от опасностей и становится более распространенной экономическая оценка риска. Для отдельных граждан понятие защищенности проявляется в снижении риска для жизни, здоровья, нормальной трудовой деятельности и отдыха. Но отдельные граждане и даже различные группы населения все эти элементы риска оценивают по-разному как в зависимости от места проживания, так и в связи с принадлежностью к определенной группе, определяемой социальным статусом,

религией и другими факторами. Поэтому трудно сформировать единую шкалу для оценки риска. Тем не менее, в общем можно говорить о целевой функции управления риском, проявляющейся в обеспечении максимально возможной защищенности социальных, экономических, экологических и других систем обеспечения жизненного пространства от опасных природных и техногенных воздействий.

2.10. Принятие решений при оценке риска

Принять решение об уровне потенциального риска от возможного изменения условий окружающей среды можно на основе анализа предыстории подобных событий и при помощи методов прогнозирования природных явлений. Как правило, методика оценки риска базируется на статистической обработке данных наблюдений за параметрами процессов, взаимодействие которых может инициировать нежелательное изменение характеристик окружающей среды. Например, в случае оценки риска для здоровья от загрязнения окружающей среды для принятия взвешенного решения требуется определенный уровень информационного описания территории:

- многолетние измерения концентрации химических элементов с указанием их распределения по местности и по характеристикам;
- данные о гидрологии территории и синоптические характеристики;
- оценки экологических последствий от загрязнения и их влияния на здоровье населения;
- характеристика состояния защитных сооружений и уровень развития и технической оснащенности служб по мониторингу, предотвращению и преодолению чрезвычайных ситуаций.

Эффективность систем оценки риска зависит от формы и вида используемой процедуры принятия решения. Наиболее информативным является совмещение прогнозирующих процедур с режимом мониторинга окружающей среды, который может предусматривать ситуации принятия решений в реальном времени на основе накопленной до момента принятия решения информации или в результате анализа фрагментов базы данных без привязки к текущему времени. Статистический анализ рядов событий, которыми сопровождается функционирование системы мониторинга, может быть осуществлен многочисленными методами, применимость которых в каждом случае определяется совокупностью вероятностных параметров, характеризующих изучаемое явление. Однако нестационарность и параметрическая неопределенность в ситуациях, когда каждое измерение требует больших усилий и затрат средств, заставляет искать новые методы принятия решений на основе фрагментарных во времени и отрывочных по пространству данных измерений.

С развитием альтернативных методов принятия статистических решений задача поиска объективных оценок параметров происходящих в окружающей среде процессов получила новое обоснование.

Представляется возможным рассмотреть и сравнить два подхода к этой задаче: классический, основанный на процедуре априорного ограничения числа наблюдений, и последовательный анализ, базирующийся на процедуре пошагового принятия решения. Развитие компьютерных технологий позволяет реализовать оба подхода в виде единой системы принятия статистических решений.

Классическая процедура принятия статистических решений по методу Неймана-Пирсона основывается на заранее фиксированном числе n измерений, задаваемом из априорных предположений о вероятностном характере ряда наблюдений $X = \{x_1, \dots, x_n\}$. При этом принятие одной из гипотез H_0 или H_1 основывается на построении границы оптимальной критической области E_1 в форме гиперповерхности

$$L_n = L_n(x_1, \dots, x_n) = f_{a1}(x_1, \dots, x_n) / f_{a0}(x_1, \dots, x_n) = C \quad (2.31)$$

где $f(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f(x_i)$, $f_a(x)$ - плотность распределения вероятностей для

переменной x с неизвестным параметром a ; C - постоянная величина, выбираемая из условия, чтобы E_1 имела определенный уровень ошибки первого рода α .

Отношение (2.31), называемое коэффициентом правдоподобия, служит ключом к окончательному выбору между гипотезами:

- 1) если $L_n \leq C$, то принимается гипотеза H_0 ;
- 2) если $L_n > C$, то принимается гипотеза H_1 .

Содержание и смысловая нагрузка гипотез H_0 и H_1 зависит от конкретной задачи. В реальных экспериментах на основе выборки $\{x_i\}$ строится эмпирическое, а затем непрерывное распределение $F(X) = f(x)$, но при предположении о неопределенности одного или нескольких значений параметра. Как правило на основе одного из критериев согласия выбирается конкретный вид распределения и по измеренным значениям $\{x_i\}$ оцениваются его параметры.

Для методов Неймана-Пирсона и последовательного анализа возможно построение оперативных характеристик для принятия решений без конкретизации вида плотности $f_a(x)$. Для этого рассмотрим случай однородной независимой выборки, когда выборочные значения x_i ($i = 1, \dots, n$) являются независимыми реализациями одной и той же случайной величины ξ с плотностью $f_{a0}(x)$ при гипотезе H_0 и плотностью $f_{a1}(x)$ при гипотезе H_1 . При этом параметр a истинной плотности $f_a(x)$ может не совпадать с a_0 или a_1 . Показано, что имеют место следующие соотношения для ошибок первого и второго рода (α и β):

$$\alpha \approx \exp[-0.5 \{(E_{a1}\xi - E_{a0}\xi)(D_{a0}\xi)^{-1/2}\}^2 n], \quad \beta \approx \exp[-0.5 \{(E_{a1}\xi - E_{a0}\xi)(D_{a1}\xi)^{-1/2}\}^2 n], \quad (2.32)$$

где

$$E_a\xi = \int_{-\infty}^{\infty} \ln [f_{a1}(x) / f_{a0}(x)] f_a(x) dx, \quad (2.33)$$

$$D_a\xi = \int_{-\infty}^{\infty} \{\ln [f_{a1}(x) / f_{a0}(x)]\}^2 f_a(x) dx - (E_a\xi)^2, \quad (2.34)$$

В случае последовательной процедуры оперативная характеристика имеет вид:

$$L(a) \approx [A^{h(a)} - 1] / [A^{h(a)} - B^{h(a)}], \quad (2.35)$$

где $h(a)$ является корнем уравнения:

$$\int_{-\infty}^{\infty} [f_{a1}(x) / f_{a0}(x)]^{h(a)} f_a(x) dx = 1 \quad (2.36)$$

A и B - два порога для коэффициента правдоподобия $L_n(x)$, для которых справедливы оценки:

$$B \approx \beta / (1-\alpha), \quad A \approx (1-\beta) / \alpha, \quad (2.37)$$

В соответствии с этим, как и в классическом алгоритме $L(a_0) = 1-\alpha$,

$L(a_1) = \beta$. Отсюда следует, что среднее число наблюдений в последовательном анализе можно оценить величиной:

$$E_a v = [(1-\alpha) \ln[\beta/(1-\alpha)] + \alpha \ln[(1-\beta)/\alpha]] / E_{a0}\xi, \quad \text{при } a=a_0; \quad (2.38)$$

$$E_a v = [\beta \ln[\beta/(1-\alpha)] + (1-\beta) \ln[(1-\beta)/\alpha]] / E_{a1}\xi, \quad \text{при } a=a_1.$$

При значении $a = a^*$, когда $E_a * \xi = 0$ и $E_a * \xi^2 > 0$ имеем

$$E_{a^*} v \approx [-\ln[\beta/(1-\alpha)] \ln[(1-\beta)/\alpha]] / E_{a^*} \xi^2 \quad (2.39)$$

Согласно (2.38) и (2.39) в последовательной процедуре число наблюдений для вынесения решения является случайной величиной v , среднее значение которой $E_a v$ может быть меньше или больше n . Чтобы судить о возможных значениях v , необходимо знать распределение $P\{v = n\} = P_a$, для которого справедливо выражение:

$$E_a v \cdot P_a(n) = W_c(y) = c^{1/2} y^{-3/2} (2\pi)^{-1/2} \exp[-0.5c(y+y^{-1}-2)], \quad (2.40)$$

где

$$0 \leq y \leq n |E_a \xi| < \infty, c = K |E_a \xi| / D_a \xi = (E_a v)^2 / D_a v > 0, D v = K D_a \xi / (E_a \xi)^3, E v = K / E \xi,$$
$$K = \begin{cases} \ln A \text{ при } E_a \xi > 0, \\ \ln B \text{ при } E_a \xi < 0 \end{cases}$$

Функция распределения (2.40) в русскоязычной литературе получила название распределения Вальда:

$$W_c(x) = (c/2\pi)^{1/2} \int_0^x z^{-3/2} \exp[-0.5c(z+z^{-1}-2)] dz \quad (2.41)$$

Универсальность распределения Вальда следует из его двойственности нормальному распределению:

$$W_c(x) = \Phi[(x-1)(c/x)^{1/2}] + \Phi[-(x+1)(c/x)^{1/2}] \exp\{2c\}, \quad (2.42)$$

$$\text{где } \Phi(x) = 1/(2\pi) \int_{-\infty}^x \exp\{-t^2/2\} dt.$$

Заметим, что в случае если $|E_a \xi|$ и $|D_a \xi|$ малы по сравнению с $\ln A$ и $\ln B$, то распределение относительной величины $v/E_a v$, определенное выражением (2.36), будет хорошо аппроксимировать реальное распределение этой величины, даже если ξ распределена не по нормальному закону.

Теоретические построения относительно универсальности распределения (2.41) важны для общей оценки эффективности последовательной процедуры принятия решений. Однако эти построения не являются важными при практическом использовании распределения Вальда. Поэтому синтез системы автоматизации принятия решений, как блока ГИМС, осуществлен без учета корреляции (2.42). Это сделано в связи с тем, что в реальности часто случаи, когда число наблюдений оказывается малым и эффект асимптотической нормальности не реализуется. Возникающая при этом ситуация разрешается принятием решения по процедуре эволюционного алгоритма.

3. ПРИРОДНАЯ КАТАСТРОФА В ЗОНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

3.1. Проблема водного баланса Средней Азии

Вариации распределения атмосферных осадков на обширных территориях от степей Ставрополья и Калмыкии до горных массивов Памира и Тянь-Шаня во многом предопределются крупномасштабными пространственно-временными изменениями потоков атмосферной влаги с акваторий Каспийского и Аральского морей, залива Карабогаз-Гол (КБГ), крупных водохранилищ и накопителей коллекторно-дренажных стоков, солончаков и других типовых испарителей поверхностных и грунтовых вод на территории Средней Азии. Проблема водного баланса в Средней Азии является предметом многочисленных публикаций, ибо с ней связаны нежелательные явления типа пылевых и соляных бурь, наводнений и засух, снежных лавин, оползней и селей, других гидрологических бедствий и техногенных катастроф. Также важной является задача обеспечения влагой 129 млн. га пустынных пастбищ Средней Азии, из которых используются лишь 48%. Наконец, существует и плохо изучена корреляционная связь между водным балансом Средней Азии и глобальными изменениями окружающей природной среды. Прежде всего, повышение уровня Каспия и обмеление Аракса, деградация многих других уникальных водоемов типа озера Балхаш и залива Карабогаз-Гол, рассматриваемые как взаимосвязанные события, являются планетарным бедствием, так как влекут за собой катастрофические последствия для безопасности населения и окружающей среды обширных сопредельных территорий.

Для прикаспийских и среднеазиатских регионов площадные и гидрологические параметры акваторий Каспийского и Аральского морей, других открытых водоемов и водоводов являются важными источниками пополнения объемов атмосферной влаги,

перемещение которой в господствующем направлении ветра запад-восток способствует наращиванию объемов ледников и снежников Памира и Тянь-Шаня, что, с одной стороны, повышает и стабилизирует сток основных рек региона, создает благоприятные условия для обеспечения экологической безопасности населения, предотвращения пылевых и соляных бурь, решения насущных проблем Арала, приаральских и других областей Средней Азии, но, с другой стороны, приводит к сходу снежных лавин, возникновению оползней и селей.

Предварительные оценочные расчеты показали возможность на базе сложившейся в прикаспийском и среднеазиатском регионах гидрометеорологической ситуации уже в ближайшее время:

- компенсировать современное приращение уровня Каспия и снизить его за счет дополнительного испарения каспийской воды объемом порядка $60 \text{ км}^3/\text{год}$ со специально обводненных солончаков и впадин восточного побережья моря;
- стимулировать избыточные (относительно 1960 г.) осадки суммарным объемом около $110 \text{ км}^3/\text{год}$ в рационально выбранных пунктах регионов путем принудительной конденсации парообразных и жидкокапельных компонентов атмосферного воздуха и облачности. Искусственные осадки можно реализовать в районах западной и южной частей Аральского моря (53 м), озера Судочье (50 м), русла Узбоя, Саракамышской котловины (-38 м), Казахлышира (-28 м), Каражор (-25 м) и др., над определенными участками восточного склона водораздела Чаграйское плато северный чинк Устюрта - Западный чинк Устюрта - Куландаг - Каямдаг - хребет Копет Капланкыр.

Экспертный уровень выдвинутой здесь идеи обосновывается на основе применения ГИМС-технологии. Здесь возникают следующие задачи:

- i. Создание теоретико-информационной модели формирования потоков атмосферной влаги в прикаспийском и среднеазиатском регионах, оценка потенциального количества атмосферных осадков в локальных точках при различных климатических сценариях.
- ii. Выбор участков солончаков и впадин прибрежной полосы Каспийского моря, пригодных для обводнения по технологии, учитывающей гидрологическое и хозяйственное значение таких элементов ландшафта.
- iii. Обработка и представление исходных материалов в виде динамичных электронных пространственно-временных тематических карт, архива и базы данных экспериментов (натуры и компьютерных).

В связи со сказанным выше, исследование, проведенное в данной главе, было нацелено на адаптацию ГИМС-технологии к условиям имитационного эксперимента в зоне влияния Аральского моря и поиск возможных путей изменения динамики окружающей среды этой зоны в направлении восстановления характеристик устойчивого развития. Для реализации этой цели потребовалось развить алгоритмические и модельные средства, которые позволяют осуществлять эффективный контроль гидрофизических и гидрологических полей зоны влияния Аральского моря в условиях изменения его уровня и дать оценку реакций аквагеосистемы на реализацию антропогенных сценариев вмешательства в элементы ее водного баланса.

3.2. Анализ геофизических и гидрологических процессов в зоне Аральского моря и задачи их моделирования

3.2.1. Динамика аквагеосистемы Арала и геофизических процессов формирования его водного баланса

Аральское море расположено в Туранской низменности в центре Средне-Азиатской аридной зоны на высоте 53 м над уровнем Мирового океана на границе с пустынями Карагум и Кызыл-Кум. Оно функционирует как гигантский испаритель ($\approx 60 \text{ км}^3/\text{год}$). Его бассейн площадью более $700\ 000 \text{ км}^2$ находится под влиянием пяти государств - Казахстана, Киргистана, Таджикистана, Туркменистана и Узбекистана. До 1960 г. Аральское море представляло собой достаточно стабильный водоем с площадью 66.459

км^2 и вековыми колебаниями уровня воды в пределах ± 3 м. и сезонными ± 25 см. и являлось одним из четырех наиболее крупных внутриконтинентальных замкнутых солоновато-водных (10 г/л) водоемов земного шара. До 1960 г. наибольшая ширина акватории моря составляла 235 км с северо-запада на юго-восток и 434 км с юго-запада на северо-восток. Глубины моря распределялись до 69 м, так что 88% из них находилось в диапазоне до 30 м. Наиболее глубокая часть моря находится в западной части котловины. В южной части моря располагается равнинное пространство площадью более 11 тыс. кв. км современной и древней дельты р. Аму-Дары, южнее переходящее в барханные песчаные массивы Заунгузских Каракумов. На востоке Аральское море граничит с пустынной равниной Кызылкумов с общим уклоном в сторону моря. Здесь характерными рельефами являются бугристо-грядовые пески с широкими сухими руслами древних притоков Сыр-Дары и Аму-Дары. На севере и северо-западе береговая линия моря ограничивается барханными песками предгорий Мугоджар.

Река Аму-Дарья для бассейна Аральского моря всегда играла важное значение как один из главных элементов его водного баланса. Предпринятые в 60-е годы ирригационные мероприятия привели к современному плачевному состоянию этого региона с ожидаемым распространением негативных процессов далеко за его пределы, что побудило многих исследователей искать возможные пути их предотвращения на основе моделирующей системы EPIC (Environmental Policies and Institutions for Central Asia) создали модель управления водным режимом зоны влияния Аму-Дары. Эта модель определяет оптимизацию ирригационной сети с расчетом среднемесечного контроля водных потоков и учетом потребностей в воде на ближайшие 15 лет. Модель было откалибрована по данным состояния водной системы зоны Аму-Дары, зарегистрированным в 1994 г. и 1997 г. Расчеты по этой модели, не учитывающей всей совокупности прямых и обратных связей в системе водного баланса Средней Азии носят более символический характер, чем могут служить руководством к принятию реальных решений. Опыт этого моделирования и высказанные авторами идеи позволяют перейти к более сложной модели, реализация которой осуществлена ниже.

Климатические условия функционирования Аральского моря определяются охарактеризованным выше его окружением. Колебания температур в зоне моря могут достигать 78°C . Среднеянварская температура составляет -14°C , иногда опускаясь до -33°C . Средняя температура в июле равна $+26^\circ\text{C}$, достигая в отдельные годы уровня $+45^\circ\text{C}$. Вообще климатическая обстановка в Приаралье характеризуется изменчивостью, не связываемой с антропогенными процессами. Так за период 1951-1960 гг. межгодовая изменчивость температуры воздуха колебалась от 4°C до 6°C , а в период с 1971 по 1980 гг. зимняя температура оказалась ниже нормы на 5.5°C . За последующие годы наметилась тенденция к переходу годового режима температуры на континентальный характер. В табл. 3.1 приводятся некоторые показатели отклонений средних температур от многолетних норм. Эти величины позволяют при формулировке синоптических сценариев задавать интервалы климатической неопределенности.

Таблица 3.1. Отклонения от нормы средних температур ($^\circ\text{C}$) воздуха по сезонам в Приаралье.

Зона	Весна	Лето	Осень	Зима
Аральское море	1,4	0,4	-0,1	0,5
Монсир	0,6	0,2	1,1	1,3
Казалинск	0,9	0,6	1,5	-0,1
Карак	0,8	0,2	0,8	0,3
Чабанказган	1,1	0,6	0,7	-1,5
Муйнак	0,9	0,5	-0,3	-0,6
Чирик-Рабат	0,9	0,5	1,0	0,4
Кунград	1,4	1,4	1,1	-0,1
Косбулак	1,3	0,8	0,0	0,0

Сумма годовых осадков над морем колеблется около 100 мм, тогда как испарение оценивается величиной 1250 мм/год (т.е. ежегодно с поверхности моря испаряется слой воды в 115 см.). Температурный режим самого моря характеризуется колебаниями температуры воды от 20-25°C летом до -0.7°C зимой, когда значительная акватория моря покрывается льдом. Так как море становится мелководным, то прогревание и охлаждение воды в нем иногда достигает дна.

Располагаясь среди пустынь, море постоянно находится под воздействием ветра. Осенью и зимой дуют северо-восточные ветры, приносящие холодный воздух из Сибири, весной и летом дуют юго-западные ветры, приносящие влагу с Атлантики, Средиземного моря и Каспия. Роза ветров и их скорости являются важными параметрами, учет которых при анализе водного баланса Аральского моря должен осуществляться с наибольшей тщательностью. На рис. 3.1 схематически отражены розы ветров над акваторией Арала. Согласно оценкам Бортника и Чистяевой (1990) средняя годовая скорость ветра колеблется в зависимости от территории между значениями 3-7 м/с. Район Аральского моря характеризуется большой дисперсией скоростей ветра, которые могут стабильно достигать 30 м/с. Например, на западном побережье в среднем за год такие скорости наблюдаются в течение более 50 суток, что очень важно для рассматриваемого в данной работе сценария восстановления уровня Арала.

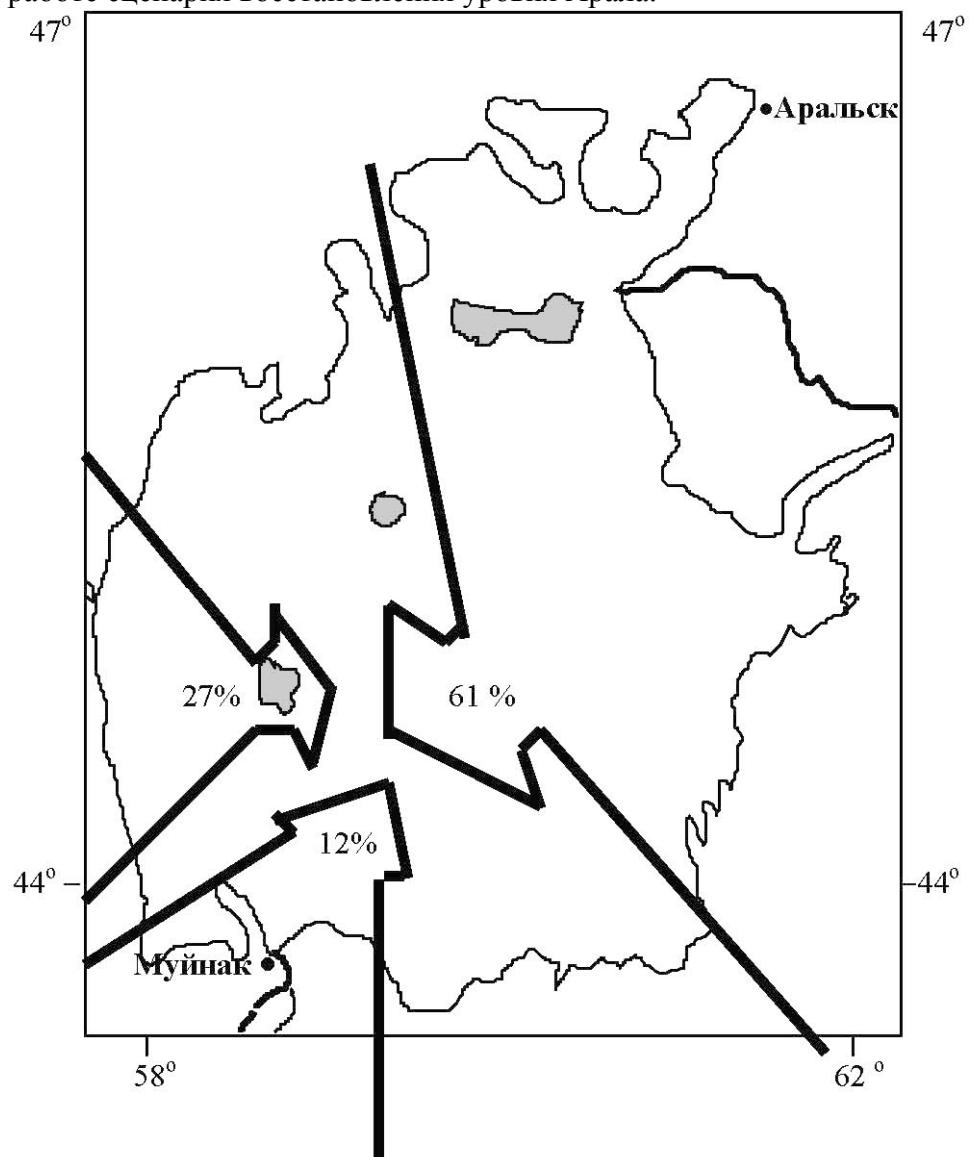


Рис. 3.1. Характерные направления ветров в зоне Аральского моря и их повторяемость (Бортник, Чистяева, 1990)

Составляющие водного баланса Арала обсуждаются многими авторами. Еще в 1968 году, когда только наметились отрицательные тенденции в водном балансе Арала, в работе Корнакова и др. (1968) был дан исчерпывающий анализ его основных элементов. В то время из-за расширения орошаемых земель (к 1980 г. они увеличились на 6,5 млн. га) потери стока в дельте р. Аму-Дары составляли 9,1 км³ / год, а с учетом водозабора на орошение ниже г. Нукус эти потери достигали 10,7 км³ / год, или 23,3 % от стока Аму-Дары. У различных авторов эти оценки изменяются и поэтому при моделировании водного баланса задание входных оценок связано с некоторой неопределенностью. Во всяком случае, оценка среднего многолетнего (1934-1960 гг.) притока в дельту р. Аму-Дары близка к величине 47-49 км³/год. Для р. Сыр-Дарья эта величина равна 15-24 км³ /год. Сток других шести рек составлял 43,8 км³/год.

До 1970 г. на орошение использовалась незначительная часть общего годового стока рек. При этом площади орошаемых земель располагались преимущественно в поймах рек, что приводило к возврату излишков поливных вод в материнские реки. Но в 60-е годы более 30% стока Аму-Дары было направлено в Главный Туркменский и другие более мелкие каналы и для заполнения многочисленных водохранилищ. В результате коллекторно-дренажного стока начали образовываться новые незапланированные водоемы, участие которых в водном балансе Аральского региона выразилось лишь через испарение, а их использование в водохозяйственном балансе ограничено по причине существенной минерализации (1,5-12,0 г/л). За период с 1975 по 1988 гг., после которого наметилась некоторая стабилизация, суммарная площадь озер и водохранилищ в низовьях Аму-Дары выросла с 483 км² до 1256 км².

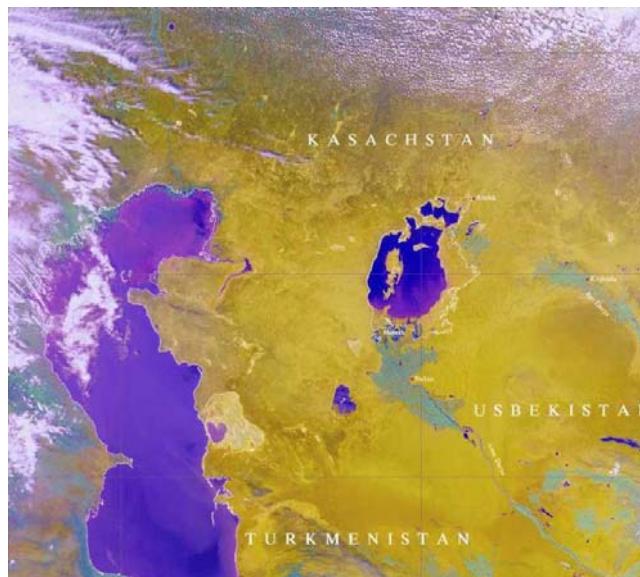
По мнению Кукса (1994) толчком к катастрофическому развитию процесса антропогенного опустынивания в Приаралье послужило совмещение избыточных водозаборов с засушливым периодом и маловодьем рек 1974-1977 гг. Произошел резкий спад речного стока с увеличившимся испарением, как с акватории моря, так и с прилегающих территорий. Уже к концу 1980 г. суммарная площадь обсохших водоемов только в дельте Аму-Дары достигла 310 км². В 1984 г. Стоки Сыр-Дары и Аму-Дары оценивались величинами 4 км³/год и 28 км³/год. Начался процесс трансформации земных покровов с преобладанием переходов гидроморфных, болотных и луговых почв в солончаковые и такыровидные. Площадь озер на дельтовых равнинах Аральского региона изменялась от 400 тыс. га в 1960 г. до 120 тыс. га в 1970 г. и пришла к почти полному исчезновению к концу 20-го столетия. Береговая линия моря ушла от позиций 1960 г. на десятки километров. Например, ранее рыболовецкий поселок Куланда сейчас удален от моря на 35 км. Характерная картина изменения элементов водного баланса Аральского моря представлена в табл. 3.2 и 3.3 и рис. 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2. Динамика притока воды в Аральское море, км³/год (Кукса, 1994).

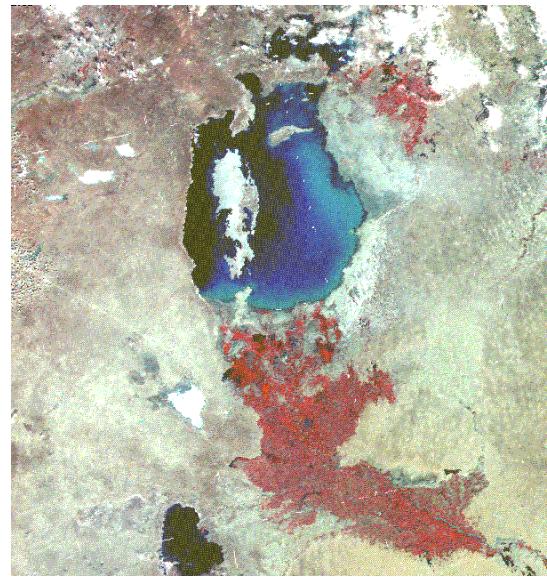
Год	Амударья	Сырдарья	Всего	Год	Амударья	Сырдарья	Всего
1959	40,0	18,3	58,3	1974	6,2	1,9	8,1
1960	37,8	21,0	58,8	1975	10,0	0,6	10,6
1961	29,2	-	29,2	1976	10,3	0,5	10,8
1962	29,1	5,7	34,8	1977	7,2	0,4	7,6
1963	29,9	10,6	40,5	1978	18,9	-	18,9
1964	36,5	14,9	51,4	1979	10,9	2,9	13,8
1965	25,2	4,6	29,8	1980	8,3	-	8,3
1966	33,1	9,5	42,6	1981	5,9	-	5,9
1967	28,6	8,6	37,2	1982	0,04	-	0,04
1968	28,9	7,2	36,1	1983	2,3	-	2,3
1969	55,1	17,5	72,6	1984	7,9	-	7,9
1970	28,7	9,8	38,5	1985	2,4	-	2,4
1971	15,3	8,1	23,4	1986	0,4	-	0,4
1972	15,5	6,9	22,4	1987	10,0	-	10,0
1973	33,4	8,9	42,3	1988	16,0	7,0	23,0

Таблица 3.3. Средние многолетние значения водного баланса Аральского моря для отдельных периодов. В числителе указаны объемы элементов водного баланса (км^3), в знаменателе см слоя воды (Кукса, 1994).

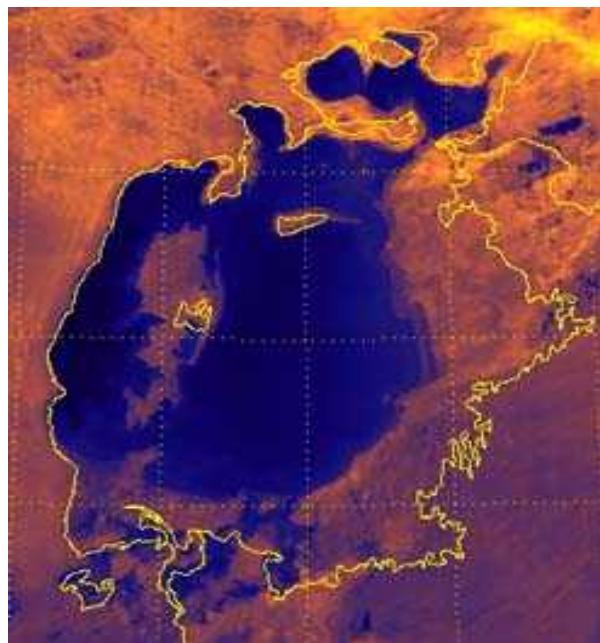
Период	Приход		Расход (испарение)	Водный баланс	Изменение уровня, см	Невязка баланса
	Речной сток	Осадки				
1911/1960	56,0/84,7	9,1/13,8	66,1/100,0	-1,0/-1,5	0,1	-1,6
1961/1970	43,3/68,5	8,0/12,7	65,4/103,5	-14,1/-22,3	-21,0	-1,3
1971/1980	16,7/29,3	6,3/11,0	55,2/96,8	-32,2/-56,5	-57,6	1,1
1981/1985	2,0/4,1	7,1/14,7	45,9/96,2	-36,8/-77,4	-80,0	2,6
1986/1988	10,8/28,0	6,2/15,4	47,0/116,3	-30,0/-72,9	-65,6	-7,3



(а) Снимок зоны Аральского моря в апреле 1991 г.
(NOAA-AVHRR).



(б) Снимок Аральского моря в 1995 г. со
спутника Ресурс-01 с помощью сканера MSU-SK.



(в) Современное состояние акватории
Аральского моря. Цветовой контраст указывает
контуры береговой линии в 1960 г. (Снимок со
спутника Ресурс-01)



(г) Снимок со спутника Терра (EOS-AM1) 5
ноября 2000 г., радиометр MODIS, разрешение
500 м.

Рис. 3.2. Некоторые фрагменты снимков из космоса зоны Аральского моря в различное время.



Рис. 3.3. Состояние Аральского моря по изображению со спутника Aqua (MODIS) 12 августа 2003 г. Пространственное разрешение 250 м.

Ухудшение экологической обстановки в зоне влияния Аральского моря привело, например, в Узбекистане к росту материнской и детской смертности. Так в 1994 г. смертность еще не родившихся детей составляла 120 на 100 тыс. матерей, а смертность среди новорожденных была 60 на 1000 родившихся. Заметно изменилась климатическая ситуация, что начало сказываться на экономике Казахстана и Узбекистана. На сайтах многих международных организаций широко обсуждается проблема Арала. Многие авторы обеспокоены затянувшейся беспредметной дискуссией о глобальном характере катастрофы Арала, когда необходимо принимать конкретные решения по его спасению или хотя бы стабилизации его уровня. Ведь развивающиеся экологическая и гуманитарная катастрофы, связанные с высыханием Аральского моря, приведут к огромным экономическим и нравственным потерям коренных народов, заставив их покинуть традиционные места проживания, так как их поля и пастбища погибают от песчано-пылевых бурь и ядовитой пыли.

Из истории Аральского моря известно, что в течение последних десяти тысяч лет оно восемь раз высыхало и вновь наполнялось. Сейчас мы являемся свидетелями его девятого высыхания, но отличающегося от предыдущих наличием мощного антропогенного фактора, проявившегося в людской бесхозяйственности. Эта бесхозяйственность

проявилась в необдуманном резком и масштабном изменении речного стока в Арал, а также в отсутствии каких-либо конструктивных оценок последствий этого изменения. В результате всего лишь через 30 лет богатейший природными запасами регион-оазис среди пустынных песков Каракумов и Кызылкумов превратился в безжизненную пустыню. Действительно, за этот период море потеряло три четверти водного объема, его площадь сократилась более чем на 50%. Обнажилось и подверглось опустыниванию более 33 тыс. квадратных километров морского дна. С этой территории ветры ежегодно выносят свыше 100 тыс. тонн соли и тоннодисперсной пыли с примесями различных химикатов и ядов, поднимая их в высокие слои атмосферы. Кривые рис. 3.4 наглядно показывают корреляционную динамику основных характеристик Аральского моря - уровня и солености. Ясно, что развитие этой динамики будет ухудшать экологическую обстановку на все более широких пространствах прилегающих территорий.

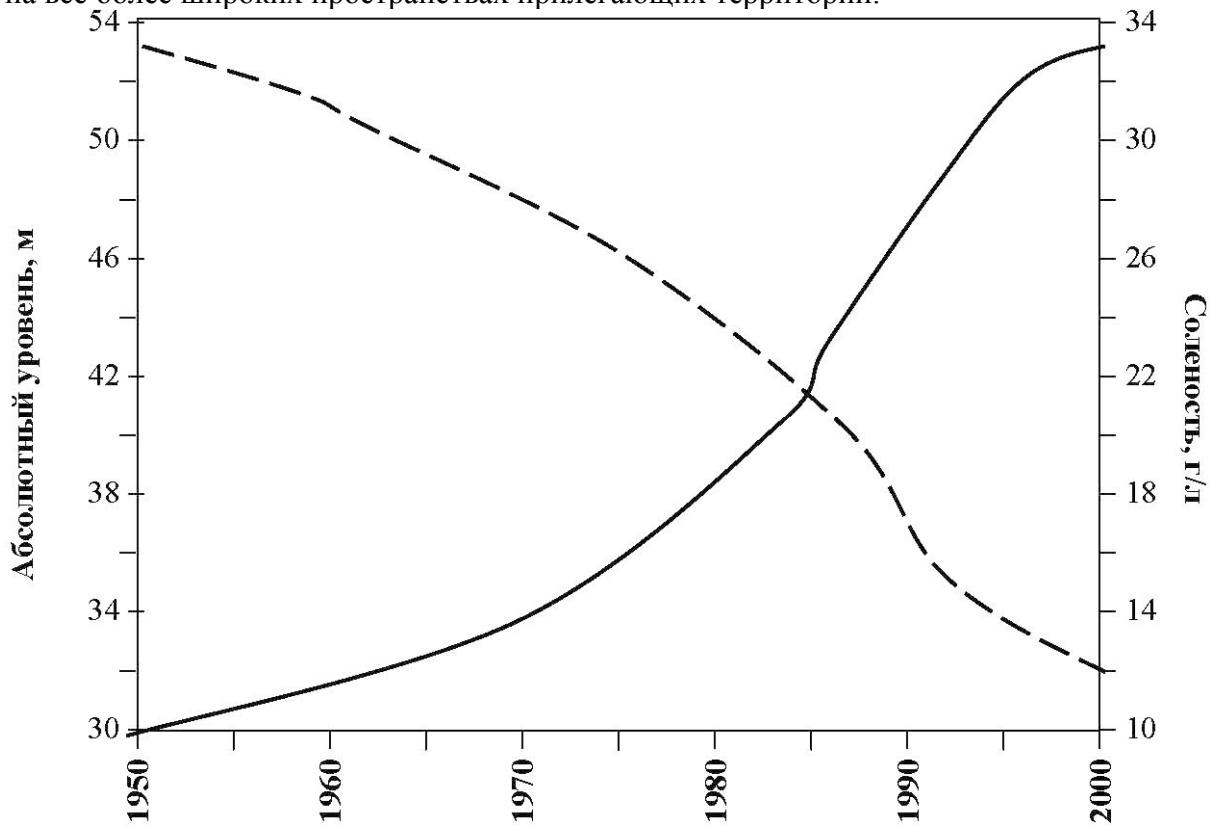


Рис. 3.4. Динамика уровня (сплошная кривая, м) и солености (пунктирная кривая, г/л) Аральского моря.

Многие авторы ищут решение проблемы Аральского моря, пытаясь уравновесить потоки забираемых на орошение и возвращаемых вод и решить проблему хотя - бы частично, стабилизировав сложившуюся ситуацию. В настоящее время суммарный объем возвратных вод оценивается величиной $36-40 \text{ км}^3$. Из них около 50% составляют речные воды ($18-20 \text{ км}^3$), 13% которых сильно засолены. Значительная доля возвратных вод реализуется через дренажные и коллекторные сети, утечки из которых привели к неконтролируемому формированию сотен водоемов с общим объемом более 30 км^3 и ветландов площадью в десятки тысяч га. Для стабилизации уже сформировавшегося водного режима бассейна Аральского моря с решением целого ряда сложных экологических проблем, безусловно, необходимо разрабатывать межгосударственную систему регулирования возвратными водами. Более глобальный взгляд на эту проблему подсказывает, что можно найти приемлемые решения, которые могут облегчить экономическую нагрузку и увязать региональный водный баланс с глобальным. Проект

ежегодной переброски 27-60 км³ вод сибирских рек в Центральную Азию, возникший в 80-х годах прошлого столетия, а иногда обсуждающийся и сейчас, оказался проблематичным с экономической и экологической позиций его оценки. Тем не менее, заложенная в нем идея не лишена смысла для дальнейшего теоретического изучения подобных сценариев. Один из таких сценариев рассматривается здесь.

7.2.1. Адаптация ГИМС-технологии к геофизическим условиям зоны Аральского моря

Область географических информационных систем (ГИС) является наиболее развитой частью природного мониторинга. ГИС лежит на стыке компьютерной картографии с базами данных и дистанционным зондированием. Элементами ГИС являются компьютерная сеть, база данных, сеть передачи данных и система отображения реальной ситуации на дисплее компьютера. Многочисленные примеры ГИС позволяют утверждать, что ГИС-технология обеспечивает удобное для массового пользователя средство контроля состояния объекта мониторинга и служит эффективным механизмом объединения многофакторной информации об объекте. Однако ГИС-технология имеет серьезные ограничения, когда речь идет о сложных задачах природного мониторинга, требующих создания динамичного образа среды в условиях отрывочных данных по пространству и во времени. Основной недостаток ГИС - технологии состоит в том, что она не ориентирована на многоплановый прогноз состояния объекта мониторинга. А именно такой класс задач поставлен в данной работе.

Важный шаг в развитии ГИС - технологии сделан в работе Kondratyev et al. (2002), где теоретически обоснована и практически применена ГИМС - технология. Эта технология устраняет многие недостатки ГИС - технологии и дает возможность синтеза систем мониторинга с функциями прогноза. Ключевым звеном ГИМС - технологии является математическая модель контролируемого объекта или процесса. Именно сочетание эмпирической и теоретической частей ГИМС - технологии позволяет оперативно оценивать текущие и прогнозные изменения окружающей среды исследуемого региона.

Состояние природных объектов характеризуется большим разнообразием параметров. Среди них такие, как характеризующие тип почвы и растительности, водный режим территории, солевой состав почво-грунтов, уровень залегания грунтовых вод и многие другие. В принципе, требуемая информация об указанных параметрах может быть получена с различной степенью достоверности и производительности из данных наземных наблюдений, дистанционных измерений и из банков данных географических информационных систем, где содержится априорная информация, накопленная в прошлые годы. Проблема, возникающая перед ответственным за принятие соответствующего решения, заключается в получении ответов на следующие вопросы:

- 1) какие приборы целесообразно использовать для проведения наземных и дистанционных измерений;
- 2) как сбалансировать количество наземных измерений и объем дистанционных данных с учетом их информационного содержания и стоимости;
- 3) какие математические модели пространственно-временных изменений параметров природных объектов целесообразно использовать для интерполяции и экстраполяции данных контактных и дистанционных наблюдений с целью уменьшения объема (количества) последних и, соответственно, уменьшения стоимости работы в целом, а также для получения прогноза функционирования наблюдаемого объекта.

Любая подсистема окружающей среды рассматривается как элемент природы, взаимодействующий через биосферные, климатические и социально-экономические связи с глобальной СПО. Для конкретного объекта мониторинга создается модель, описывающая это взаимодействие и функционирование различных уровней пространственно-временной иерархии всей совокупности процессов в окружающей среде, влияющих по предварительным оценкам на состояние объекта. Модель охватывает характерные для данной территории процессы природного и антропогенного характера и в начале своей разработки опирается на существующую информационную основу. Структура модели

ориентируется на адаптивный режим ее использования с последующей эпизодической коррекцией ее параметров или ее блоков.

В результате соединения системы сбора информации об окружающей среде, модели функционирования геоэкосистемы данной территории, системы компьютерного картографирования и средств искусственного интеллекта синтезируется единая ГИМС территории, обеспечивающая прогнозные оценки последствий реализации техногенных проектов и другие оценки функционирования геоэкосистемы. Для Аральской зоны реализация ГИМС-технологии требует выделения характерных элементов природно-антропогенной системы, функционирующей в этой зоне. Эта процедура реализуется через множество двумерных матричных структур - идентификаторов, в символной форме описывающих географическую конфигурацию зоны, распределение почвенно-растительных формаций, дислокацию антропогенных объектов, положение характерных синоптических зон, топографию местности и конфигурацию водных артерий территории.

Для уравнений водного баланса Приаралья важными являются элементы земных покровов, влияние которых на испарение и поверхностный сток проявляется через их характеристики. Идентификатор $A_1 = \| a_{ij,1} \|$ определяет конфигурацию территории, которая учитывается в модели водного баланса. Не нарушая общности, примем постоянную географическую сетку размерами $\Delta\varphi$ по широте φ и $\Delta\lambda$ по долготе λ . Тогда идентификатор A_1 , заложенный в базу данных ГИМС, обеспечивает гибкий учет участков территорий в зоне Аральского моря, которые будут приниматься во внимание:

$$a_{ij,1} = \begin{cases} 1 & \text{если участок территории включается в водный баланс;} \\ 0 & \text{если участок территории не учитывается в водном балансе.} \end{cases}$$

Идентификатор $A_2 = \| a_{ij,2} \|$ задает пространственное распределение элементов земных покровов, осуществляя их символенную привязку к составляющим водного баланса территории. В табл. 3.4 перечислены характерные элементы покровов в зоне, учитываемой идентификатором A_1 .

Таблица 3.4. Определение элементов идентификатора A_2 .

Тип земной поверхности	Идентификатор
Открытая водная поверхность озера	<i>a</i>
Орошаемая территория	<i>b</i>
Участок реки	<i>c</i>
Заболоченный участок	<i>d</i>
Высохшее русло реки	<i>e</i>
Древесно-кустарниковая растительность	<i>f</i>
Такыр	<i>g</i>
Солончак	<i>h</i>
Степь	<i>t</i>
Участок моря	<i>p</i>
Песок	<i>n</i>
Тростниковые заросли	<i>m</i>
Пастбищная растительность	<i>o</i>

3.2.3. Формирование базы данных об элементах окружающей среды зоны Аральского моря

В период с 1972 г. по 1990 г. на территории Средней Азии осуществлялись регулярные сеансы дистанционного мониторинга с применением микроволновой, оптической и ИК - технологий зондирования с использованием летающей лаборатории ИД-18 Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. При этом путем синхронного использования аэрокосмических и наземных средств проводились исследования региональных биогеоценозов. Материалы радиолокационных, радиотепловых, фотографических, оптоэлектронных съемок и измерений легли в основу базы дистанционных данных, которая включает информацию о различных характеристиках земных покровов, гидрометеорологических процессов и атмосферы. В

частности, база данных содержит сведения об особенностях микро и макрорельефов, типе флористического фона, степени увлажнения и засоления почвогрунтов, подповерхностных аномалиях (пустоты, линзы грунтовых вод и др.), состоянии атмосферы. В базу данных входят оценки зависимостей отражательной и излучательной способностей подстилающей поверхности в различных диапазонах длин волн от вариаций физико-химических и геофизических параметров элементов окружающей среды. Эти данные использовались при решении задач идентификации на основе изложенных выше алгоритмов.

При качественных радиолокационных исследованиях отражательных свойств протяженных природных образований дешифровочным признаком может служить удельная эффективная поверхность рассеивания (ЭПР). Этот параметр определяет общий фон радиолокационного изображения (РЛ-изображения) местности и позволяет сравнительно легко обнаруживать на снимке участки с аномальными отражательными свойствами. Однако, затруднено использование понятия ЭПР при попытках количественного сопоставления РЛ-изображений различных участков местности или РЛ-снимков одной и той же территории, поученных в различные моменты времени. Для количественной интерпретации РЛ-снимков использовались текстурные особенности и спектр-структуру изображений, обусловленных особенностями локальных параметров соответствующей подстилающей поверхности. Оба этих компонента имеют свои статистические характеристики, при этом статистика первого порядка спектр-структуры и текстурной составляющей описываются многомерной плотностью вероятности, моментами второго порядка и автокорреляционной функцией, которые отражают взаимосвязь между интенсивностью сигналов в соседних элементах кадра. Пространственный радиус корреляции текстуры РЛ-снимка в предельном случае сравним с разрешающей способностью измерителя и существенным образом зависит от крупномасштабных вариаций рельефа, биомассы растительности и параметров других элементов ландшафта. Следовательно, статистика первого порядка текстуры может изменяться даже в пределах одного снимка и одного класса объектов.

СВЧ-радиометрические измерения показали наличие типовых спектров радиояркостной температуры. Спектры радиояркости с положительными значениями первых разностей типичны для некоторых типов льдов, водоемов с неглубоко расположенными зарослями водорослей, для молодых (горячих) лавовых потоков и полей, бетонных покрытий и некоторых типов сухих почвогрунтов. Монотонно убывающие спектры характерны для увлажненных почвогрунтов, акваторий, подтопленного леса, покрытых растительностью водоемов, рисовых чеков и др. Спектры со знакопеременными значениями первых приращений присущи многослойным интерферирующими структурам, гетерогенным образованиям типа торфяников и кромкам лесных пожаров.

Поляризационные и дисперсионные характеристики радиотеплового поля оказываются значимыми величинами при аэрокосмических исследованиях акваторий, бетонных и грунтовых взлетно-посадочных полос, а также других природных и антропогенных образований с гладкой поверхностью. Такие образования использовались в качестве калибровочных СВЧ-реперов.

Синхронные дистанционные и наземные измерения интенсивности излучения радиотеплового поля солончаков на волнах 1.35, 2.25 и 20 см показали, что солончак имеет обширные и устойчивые (от сезона к сезону) области с небольшими вариациями радиояркостной температуры. По контуру солончака наблюдается резкое уменьшение радиояркостной температуры на длинах волн 0.8 и 2.25 см, а ее минимальное значение достигается в дециметровом диапазоне в центральной части солончака. В качестве эталона использовалось плато Устюrt, сравнение с поляризационными эффектами которого позволяет осуществлять надежную классификацию земных покровов.

База данных содержит сведения о радиояркостных контрастах по всей территории Средней Азии. При этом в качестве элементов территории выделены замкнутые системы

водоемов, накопители дренажных вод, комплексы искусственных и естественных озер, увлажненные солончаки и такыры. Опыт ее формирования показал, что только за счет дистанционных измерений с борта самолета-лаборатории возможна оперативная оценка влагосодержания атмосферы по контуру всей территории Каспийско-Аральской системы. А эпизодические трассовые измерения над внутренними территориями позволяют уточнять распределение земных покровов и уровень залегания грунтовых вод. Примеры записей радиояркостных контрастов с борта самолета-лаборатории ИЛ-18 приведены на рис.3.5 и 3.6.

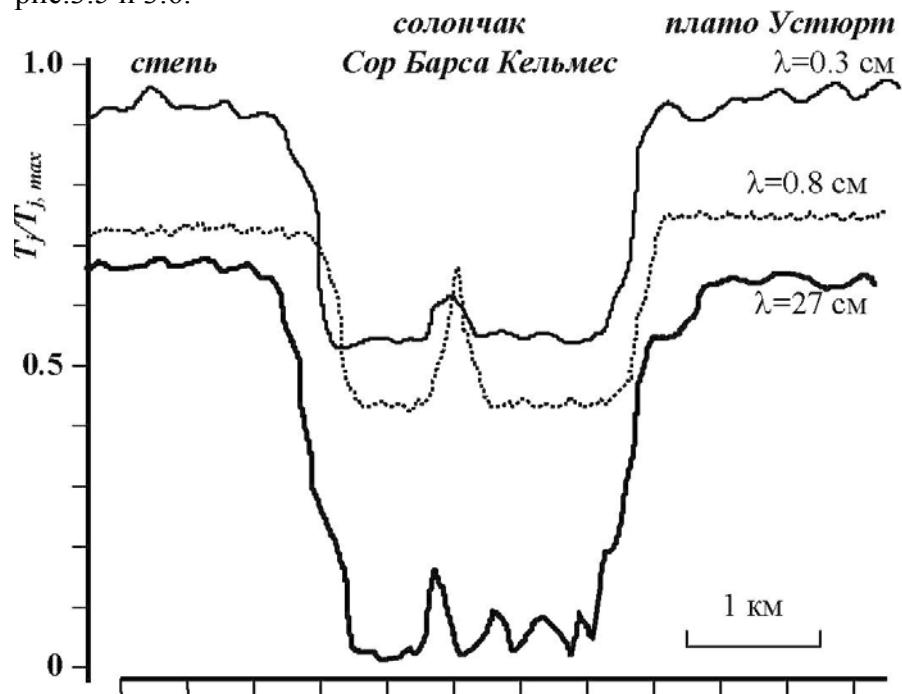


Рис. 3.5. Фрагмент записи с борта самолета-лаборатории ИЛ-18 на границе плато Устюрт.

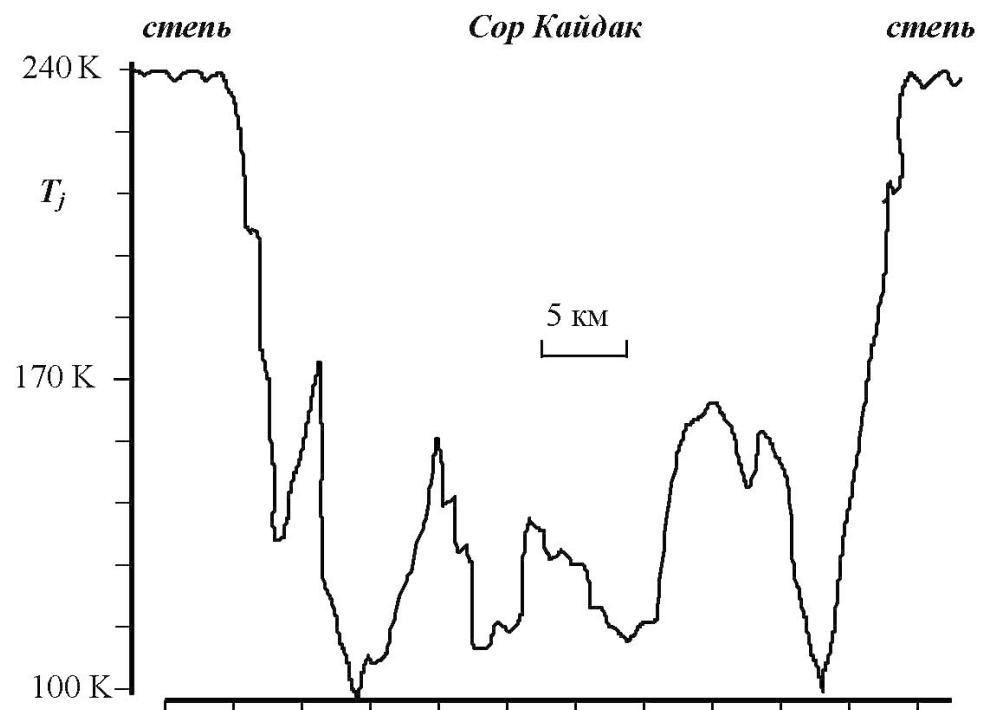


Рис. 3.6. Фрагмент записи с борта самолета-лаборатории ИЛ-18 в районе солончака Кайдак (длина волны 1.35 см).

3.2.4. Особенности моделирования составляющих водного баланса Аральского региона

Водный баланс непосредственно Аральского моря рассчитывался многими исследователями. Но в этих расчетах учитывались корреляции и оценки, усреднявшиеся по большим территориям, прилегающим к котловине Арала. Совершенно очевидно, что отмеченная выше нестационарность климатической обстановки и изменчивость структуры земных покровов требуют более подробного отражения в уравнениях водного баланса роли детального описания климатических параметров и морфологии элементов, участвующих в испарении воды.

Основой модели водного баланса Аральского региона может быть типовая модель регионального баланса влаги на ограниченной территории. Каждая территория зоны Арала может иметь часть речной сети, водоемов и участков суши. Согласно ландшафтно-гидрологическому принципу для построения имитационной модели в зоне функционирования гидрологической системы необходимо выделение фаций, что связано с типизацией флористического фона, конкретный вид которого обусловливается микрорельефом, типом и свойствами почвы, поверхностным увлажнением, глубиной залегания грунтовых вод и другими факторами. Так что в общем случае территория Ω_L характеризуется наличием m фаций, а вводная сеть имеет n однородных участков. С учетом этого составляется замкнутая система балансовых уравнений, которая служит базовой для расчета составляющих водного баланса в зоне Аральского моря.

3.3. Алгоритмическое обеспечение системы мониторинга зоны Аральского моря

3.3.1. Алгоритм восстановления динамических параметров методом дифференциальной аппроксимации

База данных системы мониторинга окружающей среды не всегда соответствует требованиям параметрической насыщенности, предъявляемым к ней ГИМС-технологией. Поэтому представляет интерес алгоритм параметризации функций контролируемой на данной территории системы, который бы не предъявлял жестких требований к базе данных. Предположим, что в режиме мониторинга измеряются N характеристик системы x_i ($i=1,\dots,N$) в моменты времени t_s ($s = 1, \dots, M$). Формальную зависимость между $x_i(t)$ представим в виде системы дифференциальных уравнений с неизвестными коэффициентами $\{a_{ijk}, b_{ij}\}$:

$$dx_i / dt = \sum_{k,j=1}^N [a_{ijk} x_j(t) x_k(t) + b_{ij} x_j(t)] \quad (3.1)$$

Задавая начальные условия:

$$x_i(0), i = 1, \dots, N \quad (3.2)$$

задачу восстановления значений $x_i(t)$ в любой момент времени на интервале наблюдения $[0, T]$ сводим к обычной задаче Коши для системы обыкновенных уравнений. Единственным препятствием к ее решению является неопределенность коэффициентов a_{ijk} и b_{ij} . В этом случае поступим традиционным путем, т.е. введем меру расхождения между рассчитанными значениями $x_i(t_s)$ и измеренными оценками $\hat{x}_i(t_s)$:

$$E = \sum_{s=1}^M \left\{ \sum_{i=1}^N [x_i(t_s) - \hat{x}_i(t_s)]^2 / N \right\} / M \quad (3.3)$$

где $0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_M \leq T$.

Тогда множество коэффициентов $\{a_{ijk}, b_{ij}\}$ может быть определено как решение следующей оптимизационной задачи:

$$E_0 = \min_{\{a_{ijk}, b_{ij}\}} E \quad (3.4)$$

Поиск минимума функции E в (3.4) согласно методике, изложенной в работе Беллмана и Роуса (1971), сводится к задаче динамического программирования. Для этого предположим, что коэффициенты $\{a_{ijk}, b_{ij}\}$ являются функциями времени.

Обозначим:

$$Y(t) = \begin{vmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \\ a_{111}(t) \\ \vdots \\ a_{NNN}(t) \\ b_{11}(t) \\ \vdots \\ b_{NN}(t) \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

Не нарушая общности можно считать, что $a_{ijk} = a_{ikj}$. Тогда, дополняя систему (3.1), вместо задачи Коши (3.1), (3.2) получим:

$$dY/dt = G(Y) \quad (3.6)$$

где функция G имеет компоненты:

$$\begin{aligned} G_i(Y) &= 0 \text{ для } i = N+1, \dots, N_c, \\ G_i(Y) &= \sum_{k,j=1}^N [a_{ijk} x_j(t) x_k(t) + b_{ij} x_j(t)] \text{ для } i=1, \dots, N; \end{aligned} \quad (3.7)$$

причем $a_{ijk}(0) = \bar{a}_{ijk}$, $b_{ij}(0) = \bar{b}_{ij}$, $N_c = N + N^2(N+1)/2$.

Отметим, что с помощью метода квазилинейаризации решение нелинейной задачи сводится к решению последовательности линейных задач. Метод представляет собой дальнейшую разработку известного метода Ньютона-Рафсона и его обобщенного варианта.

Введем последовательность функций $Y^{(1)}(t), \dots, Y^{(n)}(t)$ таких, что $Y^{(1)}(t)$ является первым приближением к решению системы (3.6). Тогда n -ое приближение найдется как решение следующей линейной системы:

$$dY_i^{(n)}(t)/dt = G_i[Y^{(n-1)}(t)] + \sum_{j=1}^{N_c} \{dG_i[Y^{(n-1)}(t)]/dY\}[Y_j^{(n)} - Y_j^{(n-1)}] \quad (3.8)$$

Как показано в работе Беллмана и Дрейфуса (1965) итерационный процесс (3.8) сходится по квадратичному закону. Решение (3.8) в общем виде записывается в следующей форме:

$$Y^{(n)}(t) = P(t) + \sum_{k=1}^{N_c} C_k H^{(k)}(t) \quad (3.9)$$

где $P(t)$ - частное решение системы (3.8), $H^{(k)}(t)$ - векторное решение однородной системы. Для определения $P(t)$ решим (3.8) при начальных условиях $Y_i(0) = 0$ ($i = 1, \dots, N_c$). Функции $H^{(k)}(t)$ находим как решения задачи Коши:

$$dY_i^{(n)}(t)/dt = \sum_{j=1}^{N_c} \{dG_i[Y^{(n-1)}(t)]/dY\}[Y_j^{(n)} - Y_j^{(n-1)}] \quad (i=1, \dots, N_c) \quad (3.10)$$

$$H^{(1)}(0) = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{vmatrix}, H^{(2)}(0) = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{vmatrix}, \dots, H^{(N_c)}(0) = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{vmatrix} \quad (3.11)$$

Из выражений (3.8) - (3.11) следует, что константы C_k являются неизвестными начальными условиями системы уравнений (3.7). Поэтому при каждой итерации в процессе нахождения частного решения и решений однородных уравнений константы C_k определим таким образом, чтобы получить решение $\mathbf{x}^{(n)}$, которое лучше всего в смысле метода наименьших квадратов согласуется с результатами наблюдений:

$$E = \min_{\{C_k\}} \sum_{s=1}^M \sum_{i=1}^N [P_i(t_k) + \sum_{k=1}^{N_c} C_k H_i^{(k)}(t_s) - \hat{x}_i(t_s)]^2 \quad (3.12)$$

Потребуем, чтобы

$$\partial E / \partial C_k = 0 \text{ для } k = 1, \dots, N_c \quad (3.13)$$

Из (3.12) и (3.13) следует, что

$$\sum_{k=1}^{N_c} A_{km} C_k + B_m = 0, m = 1, \dots, N_c, \quad (3.14)$$

где обозначено

$$A_{km} = \sum_{s=1}^M \sum_{i=1}^N H_i^{(k)}(t_s) H_i^{(m)}(t_s), B = \sum_{s=1}^M \sum_{i=1}^N [P_i(t_s) - \hat{x}_i(t_s)] H_i^{(m)}(t_s)$$

Таким образом, на каждой итерации (3.8) необходимо решать систему (3.14). Скорость сходимости этой процедуры будет зависеть от удачного выбора начальных условий.

Рассмотрим два режима использования этого алгоритма, схематически представленных для акватории Аральского моря на рис. 3.7 и 3.8. Расстояние от точки A_0 до A_i обозначим через l_i ($i=1, \dots, n$). Пусть в точках A_i фиксируется набор яркостных температур $T_{\mathcal{A}}^j = (T_{\mathcal{A}, A1}^j, \dots, T_{\mathcal{A}, An}^j)$ в некоторые стандартные моменты времени t_j ($j=1, \dots, M$). Тогда можно образовать матрицу $\|T_{\mathcal{A}, Ai}^j\|$, в пределах которой с помощью алгоритма дифференциальной аппроксимации осуществляется сведение измерений к единому моменту времени. Далее остается решить обратную задачу по определению геофизических параметров.

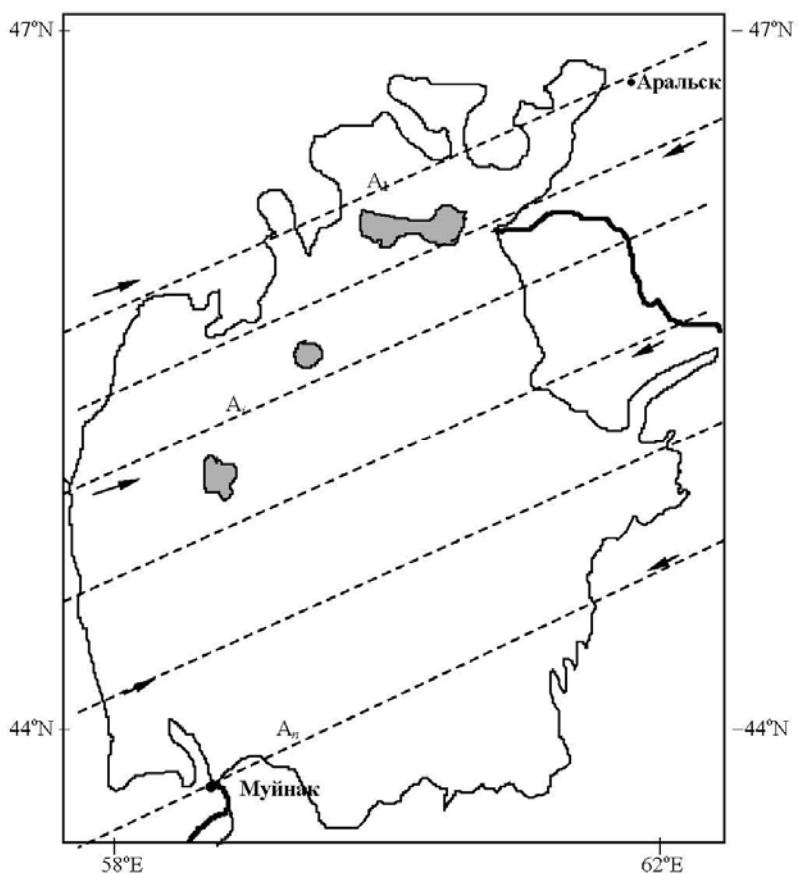


Рис. 3.7. Режим сбора данных при случайном выборе трасс полета самолета-лаборатории, направленных параллельно фиксированному азимуту.

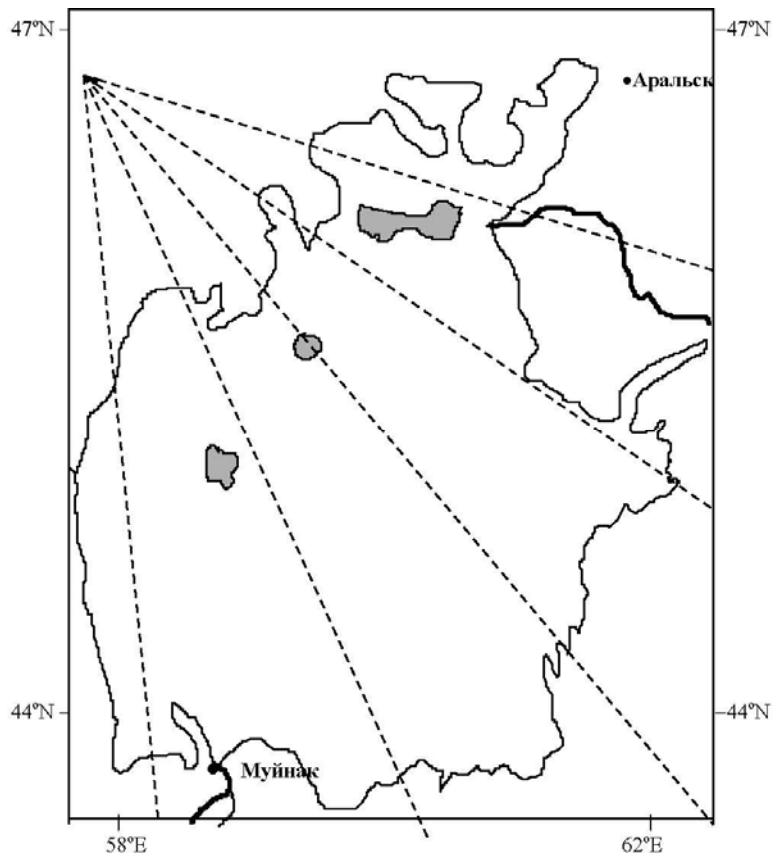


Рис. 3.8. Режим сбора данных с борта самолета-лаборатории при веерообразном планировании измерений с азимутальной привязкой к фиксированному объекту (маяку).

3.3.2. Применение метода гармонических функций для восстановления данных микроволновой радиометрии в замкнутой области

Процесс распространения тепла в плоской однородной среде G с постоянными теплофизическими свойствами (ρ - плотность, c – удельная теплоемкость, K - коэффициент теплопроводности; $\rho, C, K = \text{const} > 0$) описывается уравнением

$$\partial T / \partial t = a^2 (\partial^2 T / \partial \varphi^2 + \partial^2 T / \partial \lambda^2), \quad (3.15)$$

где $T = T(\varphi, \lambda, t)$ - температура в точке $(\varphi, \lambda) \in G$ в момент времени t ; $a^2 = K / \rho c$ - коэффициент теплопроводности G . Если процесс переноса тепла стационарен, то (3.15) переходит в обычное уравнение Лапласа:

$$\operatorname{div} \cdot \operatorname{grad} T = \partial^2 T / \partial \varphi^2 + \partial^2 T / \partial \lambda^2 = 0 \quad (3.16)$$

В этом случае T является гармонической функцией от пространственных координат φ и λ . Совместно с температурным полем $T(\varphi, \lambda, t)$ рассмотрим поле собственного излучения G в СВЧ диапазоне, интенсивность которого в соответствии с приближением Релея-Джинса при локально-термодинамическом равновесии характеризуется яркостной температурой $T_J(\varphi, \lambda, \eta, \theta, t)$, где η - длина волн электромагнитного диапазона, θ - угол наблюдения. Будем предполагать, что для достаточно малой окрестности V_M любой точки $M \in G$ выполняется условие:

$$T_J(\varphi, \lambda, \eta, \theta, t) = A_M + B_M T(\varphi, \lambda, t); (\varphi, \lambda) \in V_M; (A_M, B_M = \text{const}) \quad (3.17)$$

Представление (3.17) следует из теоретических и экспериментальных оценок T_J . Так для среды, однородной по глубине и ограниченной плоской поверхностью, справедливо равенство $T_J = \kappa T_o$, где $\kappa = \kappa(\eta, \theta, \varepsilon)$ - коэффициент излучения среды, ε - диэлектрическая проницаемость среды, T_o - термодинамическая температура. Согласно экспериментальным оценкам (Шутко, 1987) на волнах $\eta \geq 5-8$ см T_J для пресной воды практически линейно зависит от T_o ; крутизна этой зависимости составляет 0.35-0.5°K/°C. Увеличение солености S от 0 до 13-16 ‰ сопровождается уменьшением чувствительности поля излучения к вариациям температуры в широком диапазоне дециметровых волн от 10 до 50 см. При выполнении соотношений $\eta S \leq 700$; $0 \leq T_o \leq 30$ °C; $0 \leq S \leq 180$ ‰; $0 \leq \theta \leq 25$ ° чувствительность поля излучения к вариациям T_o минимальна. Из (3.17) следует, что T_J в каждой точке $M \in G$ удовлетворяет соотношению:

$$T_J(\varphi, \lambda, \eta, \theta, t) = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} [A_M + B_M T(\varphi + r \cos \alpha, \lambda + r \sin \alpha, t)] da = \\ (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} T_J(\varphi + r \cos \alpha, \lambda + r \sin \alpha, \eta, \theta, t) da$$

для любого $r \in (0, r_M)$, откуда следует, что T_J является гармонической в G и, следовательно, удовлетворяет (3.16). Типичной краевой задачей для (3.16) является задача Дирихле. На границе Γ области G задается непрерывная функция $\tilde{T}_J = \tilde{T}_J(u)$, где $u = \varphi + i\lambda$ - комплексная координата точки $(\varphi, \lambda) \in \Gamma$. Требуется найти функцию T_J гармоническую внутри G и принимающую заданные значения \tilde{T}_J на Γ . Такая функция согласно теории функций комплексного переменного является вещественной частью некоторой аналитической функции $\Phi(z)$, которую будем искать в виде интеграла Коши:

$$\Phi(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\mu(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta \quad (3.18)$$

с вещественной плотностью $\mu(\zeta)$, где $\zeta \in \Gamma$; $z = \varphi + i\lambda$ - произвольная точка внутри G . Устремляя z к некоторой точке u контура Γ и с учетом соотношений $\operatorname{Re} \Phi(u) = \tilde{T}_J(u)$ и $\operatorname{Im}(d\zeta / (\zeta - u)) = -\cos(r, n) d\sigma / r$, где r - расстояние от ζ до u (направление выбирается от ζ к u), $d\sigma$ - элемент длины на Γ ; n - внешняя нормаль к Γ . Из (3.18) для $\mu(u)$ получим интегральное уравнение Фредгольма:

$$\mu(u) - \frac{1}{\pi} \int_{\Gamma} \mu(\zeta) \frac{\cos(r,n)}{r} d\sigma = 2 \tilde{T}_J(u)$$

с непрерывным ядром $\cos(r,n)/r$, которое разрешимо при любой правой части. Решив это уравнение, из (3.18) находим $\varphi(z)$ и, следовательно,

$$T_J(\varphi, \lambda, \eta, \theta, t) = \operatorname{Re} \varphi(z).$$

В случае, когда G есть круг $|z - z_0| < R$, решение

$$T_J(\varphi, \lambda, \eta, \theta, t) = T_J(r, \psi, \eta, \theta, t) \quad (\varphi + i\lambda = z_0 + re^{i\psi}, r < R, 0 \leq \psi \leq 2\pi)$$

Задачи Дирихле получим в виде интеграла Пуассона:

$$T_J(\varphi, \lambda, \eta, \theta, t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tilde{T}_J(a) \frac{R^2 - r^2}{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\psi - a)} da,$$

где $\tilde{T}_J(a) = \tilde{T}_J(z_0 + \operatorname{Re}^{ia})$; $(0 \leq a \leq 2\pi)$.

Не нарушая общности, применим описанную методику совместно с методом дифференциальной аппроксимации к процедуре восстановления данных трассовых измерений и построения карты территории G в момент времени t^* . Пусть дистанционные измерения выполняются в интервале времени $[t_0, t_L]$ в дискретном числе точек A_i ($i = 1, \dots, N$) границы Γ . Будем считать, что за время измерений Δt уровень нестационарности данных наблюдений пренебрежимо мал, т.е. весь ряд измерений можно разбить на $M = [t_L - t_0] / \Delta t$ статистически достоверных участков $[t_j, t_{j+1}]$ ($j = 1, \dots, M$) и все измерения представить в виде матрицы $\|T_J(i,j)\|$. Метод дифференциальной аппроксимации позволяет в этой матрице все строки свести к моменту t^* , а затем по изложенной методике восстановить T_J в G .

3.3.3. Приближенный метод решения обратной задачи при идентификации геофизических параметров

В процессе мониторинга формируется множество рядов данных, с помощью которых необходимо установить корреляционные связи между параметрами изучаемого объекта. Конкретно рассмотрим ситуацию, возникающую в условиях радиофизического мониторинга. Пусть в момент t_i на выходе каждого измерительного устройства (радиометра) фиксируются величины Z_{ij} ($i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, n$) такие, что $Z_{ij} = T_j + \xi_{ij}$. Здесь T_j - реальное значение j -го параметра (радиояркостная температура на длине волны λ_j), ξ_{ij} - шумовая составляющая. Поиск корреляции сводится к определению зависимости

$$T_j = f_j(X) \tag{3.19}$$

где $X = (x_1, \dots, x_m)$ - геофизические параметры.

Существует множество приемов поиска функции f . Как правило, в качестве критерия согласия используется среднеквадратическое отклонение (Бородин, Крапивин, 1998). Однако, такой критерий не может отражать дисперсионные характеристики шумовой составляющей в измерениях. Поэтому рассмотрим поставленную задачу именно с этой позиции. Пусть функция (3.19) является линейной, и тогда имеем систему $n \geq m$ уравнений:

$$\|A_{ij}\|X = T + \Xi \tag{3.20}$$

Требуется найти решение (3.20), такое чтобы его дисперсия была минимальна. Предполагается, что $\Xi = \{\xi_1, \dots, \xi_n\}$ имеет нулевое среднее и дисперсию $\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2\}$. Такое решение $\{x_1^*, \dots, x_m^*\}$ назовем σ -решением.

Умножим i -ое уравнение системы (3.19) последовательно на величины c_{1i}, \dots, c_{mi} ($i = 1, \dots, m$) и потребуем

$$\sum_{i=1}^n c_{ji} A_{il} = \sigma_{jl}; \tag{3.21}$$

$$\delta_{jl} = \begin{cases} 1 & , j = l; \\ 0 & , j \neq l; \end{cases} (l, j = 1, \dots, m) \quad (3.22)$$

При выполнении условий (3.21) и (3.22) находим

$$x_1^0 = \sum_{i=1}^n c_{1i} T_i \quad (3.23)$$

Аналогичные соотношения записываются для x_j^0 ($j = 2, \dots, m$). Заменяя T на Z в (7.23), т.е. переходя к системе (3.20), получим:

$$\tilde{x}_1 = \sum_{i=1}^n c_{1i} (T_i + \xi_i) \quad (3.24)$$

Из (3.24) вычисляем дисперсию:

$$D[\tilde{x}_1] = \sum_{i=1}^n c_{1i}^2 \sigma_i^2 \quad (3.25)$$

Так как средние значения \tilde{x}_1 и x_1^0 совпадают по определению, то для решения поставленной задачи необходимо при соблюдении условий (7.22) найти минимум (7.25). Применим метод неопределенных множителей Лагранжа. Составим вспомогательное выражение:

$$\varphi(c_{11}, \dots, c_{1k}) = \sum_{i=1}^n c_{1i}^2 \sigma_i^2 + \mu_1 \left(\sum_{i=1}^n c_{1i} A_{i1} - 1 \right) + \sum_{j=2}^m \mu_j \sum_{i=1}^n c_{1i} A_{ij} \quad (3.26)$$

Приравнивая первые производные функции (3.26) к нулю получим:

$$2c_{1k} \sigma_k^2 + \sum_{j=1}^m \mu_j A_{kj} = 0 \quad (k = 1, \dots, n) \quad (3.27)$$

Соотношения (3.27) и условия (3.22) составляют систему $(m+n)$ уравнений, решение которых позволяет определить искомые оптимальные величины c_{ij}^* . Анализ показывает, что $D[x_j] = -\mu_j/2$. Величины μ_j находим из системы уравнений:

$$\sum_{j=1}^m \mu_j \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij} A_{i1}}{\sigma_i^2} = -2; \quad \sum_{j=1}^m \mu_j \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij} A_{il}}{\sigma_i^2} = 0; \quad l = 2, \dots, m.$$

Численные оценки показывают, что σ - решение является предпочтительнее решения, полученного по критерию среднего квадратичного отклонения. Рассмотрим случай $m=2$ и $n=3$, где x_1 - термодинамическая температура, x_2 - степень минерализации. Из (3.27) имеем

$$c_{1k}^* = \frac{1}{\Delta \sigma_k^2} \left(A_{k1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1}^2}{\sigma_i^2} - A_{k2} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1} A_{i2}}{\sigma_i^2} \right); \quad k = 1, \dots, n; \quad (3.28)$$

$$c_{2k}^* = \frac{1}{\Delta \sigma_k^2} \left(A_{k2} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i2}^2}{\sigma_i^2} - A_{k1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1} A_{i2}}{\sigma_i^2} \right); \quad k = 1, \dots, n; \quad (3.29)$$

где

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1}^2}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i2}^2}{\sigma_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{A_{i1} A_{i2}}{\sigma_i^2} \right)^2$$

Оптимальная оценка x_j^* определится соотношением

$$x_j^* = \sum_{i=1}^n c_{ji}^* Z_i \quad (j=1, 2)$$

Дисперсия оценки x_j^* имеет значение

$$D[x_1^*] = \Delta^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i2}^2}{\sigma_i^2}; \quad D[x_2^*] = \Delta^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1}^2}{\sigma_i^2} \quad (3.30)$$

Сравним на конкретном примере эту оценку с оценкой по методу наименьших квадратов. Пусть

$$\|A_{ij}\| = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \\ 1 & 3 \end{vmatrix}$$

Тогда из формул (3.30) получаем

$$c_{11}^* = (6\sigma_2^{22} + 2\sigma_3) / \Delta_1; c_{12}^* = (3\sigma_1^2 - \sigma_3^2) / \Delta_1; c_{13}^* = -2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) / \Delta_1; c_{21}^* = -(2\sigma_2^2 + \sigma_3^2) / \Delta_1;$$

$$c_{22}^* = (-\sigma_1^2 + \sigma_3^2) / \Delta_1; c_{23}^* = -(\sigma_1^2 + 2\sigma_2^2) / \Delta_1$$

где $\Delta_1 = \sigma_1^2 + 4\sigma_2^2 + \sigma_3^2$.

Далее имеем

$$D[x_1^*] = (9\sigma_1^2\sigma_2^2 + 4\sigma_1^2\sigma_3^2 + \sigma_2^2\sigma_3^2) / \Delta_1;$$

$$D[x_2^*] = (\sigma_1^2\sigma_2^2 + \sigma_1^2\sigma_3^2 + \sigma_2^2\sigma_3^2) / \Delta_1$$

Пусть \hat{x}_1 и \hat{x}_2 являются оценками параметров x_1 и x_2 , полученные по методу наименьших квадратов, т.е. они являются решениями задачи минимизации

$$\min_{x_1, x_2} \left(\sum_{i=1}^n (T_i + \xi_i - A_{i1}x_1 - A_{i2}x_2)^2 \right)^{1/2} = \left(\sum_{i=1}^n (T_i + \xi_i - A_{i1}\hat{x}_1 - A_{i2}\hat{x}_2)^2 \right)^{1/2}$$

Имеем

$$\sum_{k,j=1}^3 = 4(T_1 + \xi_1)/3 + (T_2 + \xi_2)/3 - 2(T_3 + \xi_3), \quad \hat{x}_2 = -(T_1 + \xi_1)/2 + (T_3 + \xi_3)/2$$

$$D[\hat{x}_1] = (16\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 4\sigma_3^2) / 9; D[\hat{x}_2] = (\sigma_1^2 + \sigma_3^2) / 4$$

Легко видеть, что $D[\hat{x}_1] \geq D[x_1^*]$ и $D[\hat{x}_2] \geq D[x_2^*]$. Следовательно, σ - решение предпочтительнее оценок, получаемых по методу наименьших квадратов.

3.3.4. Алгоритм рандомизированной линейно-ломанной аппроксимации

Измерения параметров окружающей среды в режиме мониторинга поставляют для системы обработки данных наборы рядов количественных характеристик, которые не могут быть проанализированы по причине их не стационарности. Существует множество способов преодоления не стационарности, позволяющих устранять противоречие между условиями применимости статистических методов и уровнем стационарности данных измерений. Один из таких способов состоит в расчленении ряда зашумленных измерений на квазистационарные участки.

Пусть результаты измерений представлены последовательностью величин Z_{ij} , где $i=1, \dots, N$ есть номер отсчета времени, $j=1, \dots, M$ – номер измерительного устройства (информационного канала). При этом считается, что

$$Z_{ij} = T_{ij} + \xi_{ij}, \quad (3.31)$$

где T_{ij} и ξ_{ij} - детерминированная и стохастическая составляющие соответственно, причем ξ_{ij} имеет нулевое среднее и дисперсию σ_j^2 .

Задача выделения кусочно-постоянной составляющей случайной последовательности (3.31) по существу сводится к классификации этой выборки по признаку принадлежности к выборкам из распределений с одинаковыми средними. Чтобы аппроксимировать выборку $\{Z_{ij}\}$ линейно-ломанной рандомизированной функцией

выполним следующие операции. Сначала находим разность $\Delta Z_{kj} = Z_{k+1,j} - \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k Z_{lj} = \Delta T_{kj} +$

$\frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \Delta \xi_{lj}$. Если величины Z_{kj} и $Z_{k+1,j}$ принадлежат выборкам с одинаковыми средними,

то $\Delta T_{kj} = 0$. В противном случае $\Delta T_{kj} \neq 0$.

Будем считать, что Z_{kj} и $Z_{k+1,j}$ принадлежат выборке из распределений с одинаковыми средними, если

$$|\Delta Z_{kj}| \leq a_{kj} \quad (3.32)$$

где $a_{kj} = d\sigma_j$, d - адаптационный коэффициент (обычно выбирают $d = 3 \cdot (1+1/k)^{1/2}$). Начиная с $k=1$ и продолжая последовательно вычислять ΔZ_{kj} и проверять условие (3.32), находим квазистационарные участки последовательности $\{Z_{ij}\}$. Если условие (3.32) не выполняется одновременно для $Z_{(k+1),j}$ и $Z_{(k+2),j}$, то элемент Z_{kj} считается последним в подмножестве, элементы которого удовлетворяют условию квазистационарности. Последующее подмножество ряда $\{Z_{ij}\}$ начинается с $Z_{(k+1),j}$ как первого элемента. Подмножество, где среднее не является постоянной величиной, т.е. условие (3.32) всегда не выполняется, формируется как подмножество случайных величин, среднее которых изменяется по линейному закону. В этом случае на всех шагах процедуры вычисляются величины $\Delta Z_{(k+m),j} = Z_{(k+m+1),j} - Z_{(k+m),j}$ ($m = 1 \div s$). Линейная аппроксимация участка ряда $\{Z_{ij}\}$ строится между значениями $Z_{(k+1),j}$ и Z_{sj} . Уравнение искомой прямой имеет вид:

$$Z - \bar{Z}_{\tilde{t}_{sj}} = \overline{\Delta Z}_{sj}(t - \tilde{t}_{sj}), \quad (3.33)$$

где t - время, отождествляемое с моментами регистрации измерений;

$$\tilde{t}_{sj} = 0.5(s-k-2), \quad \overline{\Delta Z}_{sj} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \Delta Z_{(k+1),j}, \quad N=2\tilde{t}_{sj}, \quad \bar{Z}_{sj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{(k+i),j}$$

Проверка "стабильности" угла наклона прямой (3.33) в процессе ее формирования определяется путем анализа величины $\Delta \tilde{Z}_{lj} = \Delta Z_{lj} - \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \Delta Z_{(k+1),j}$, вычисляемой на каждом шаге l . Одиночные нарушения этой стабильности, т.е. когда $|\Delta \tilde{Z}_{lj}| \geq 6\sigma_j (1+l^{-1})^{1/2}$ рассматриваются как случайные выбросы и либо исключаются из рассмотрения, либо заменяются средними значениями.

3.4. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент в геофизических исследованиях аральского региона

3.4.1. Модель для структурно-функционального анализа гидрофизических полей Арала

Как показал опыт борьбы с крупномасштабными изменениями геохимической и гидрологической обстановки в зоне Аральского моря решение проблемы приостановки процесса опустынивания и экологической деградации в этом регионе невозможно без создания многоуровневой системы мониторинга, снабженной функциями прогнозирования. ГИМС-технология предлагает возможность адаптивно-последовательного анализа информации о состоянии основных гидрофизических полей (температуры τ и солености S) с коррекцией имитационной модели (по принципу обратной связи) и управлением процессами сбора и обработки данных мониторинга. Рассмотрим имитационную модель гидрофизических полей Аральского моря (ИМГПАМ) как элемент общей модели Аральского региона. ИМГПАМ включает блоки сбора информации, первичной обработки и накопления данных мониторинга, имитации функционирования водного режима аквагеосистемы Арала, прогнозирования ее состояния, оценки невязки между измеренными и прогнозируемыми состояниями, принятия решения по планированию измерений и управлению водохозяйственными мероприятиями, сервисного

обеспечения при оперировании с входной и выходной информацией. Схематическая функциональная структура ИМГПАМ представлена на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Схема информационных потоков при функционировании ИМГПАМ.

Модель аквагеосистемы Арала является базовым элементом ИМГПАМ, обеспечивающим за счет структурного и параметрического изменения адаптацию режима мониторинга. Функциональное наполнение модели представлено в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Блоки ИМГПАМ.

Блок	Характеристика функций блока
FIC	Формирование начальных условий для модели с учетом многолетних изменений гидрофизических характеристик Аральского моря. Выбор шагов дискретизации пространства по широте и долготе. Определение шага дискретизации времени.
MSC	Модель сезонных изменений уровня Аральского моря.
MSF	Модель формирования структуры течений в Аральском море.
MTS	Модель пространственно-временного распределения температуры и солености воды.
MWD	Модель формирования поля плотности воды.
SCT	Имитация процесса конвективного перемешивания водной массы моря.
RCR	Обеспечение режима структурной и параметрической коррекции блоков ИМГПАМ с учетом результатов моделирования.

Модель описывает гидрофизические процессы в Ω_A в безледный период. Имитируются течения, конвективное перемешивание, сток рек, обменные процессы

теплом и влагой с атмосферой, турбулентный обмен теплом, солью и количеством движения. При этом для формирования начальных условий на конец зимнего сезона t_w проводится корректировка гидрофизических параметров аквагеосистемы, полученных в блоке FIC с учетом многолетних изменений уровня моря и других показателей состояния акватории Ω_A . Осуществляется коррекция расчетной сетки глубин и начальных полей солености $S(\varphi, \lambda, z, t)$ и температуры морской воды $\tau(\varphi, \lambda, z, t)$. Реализация этих процедур подчинена учету характерных оценок указанных параметров по имеющимся в базе данных фрагментам многолетних измерений на момент t_w . Начальное поле $\tau(\varphi, \lambda, z, t_w)$ задается с учетом геометрии водной массы в этот момент. Формирование поля $S(\varphi, \lambda, z, t_w)$ осуществляется с учетом разделения Ω_A на акватории с характерными однородными гидрофизическими характеристиками:

$$S(\varphi, \lambda, z, t_w) = \begin{cases} S_1 & \text{при } (\varphi, \lambda) \in \Omega_D; \\ S_2 & \text{при } (\varphi, \lambda) \in \Omega_A \setminus \Omega_D \end{cases}$$

где Ω_D - западная глубоководная акватория Арала, $S_1 = (S_D - S_A) / V_D$, $S_2 = (S_P - S_L) / V_P$, V_D и V_P - объемы воды в западной глубоководной акватории и мелководном Большом море, S_D и S_P - запасы соли в Ω_D и $\Omega_A \setminus \Omega_D$ соответственно, S_A и S_L - запасы соли на обсохших территориях, прилегающих к Ω_D и $\Omega_A \setminus \Omega_D$ соответственно.

Сезонные или внутригодовые колебания уровня Аральского моря описываются прогностической моделью MSG, традиционным образом учитывающей балансовые составляющие водного режима моря: испарение, осадки и речной сток. MSG использует средние многолетние величины этих составляющих водного баланса, а также информацию о современной гидрометеорологической обстановке в Приаралье. Блок MSG имитирует течения в Ω на основе использования методики Шкодовой и Ковалева (Бортник и др., 1994), позволяющей оценить горизонтальные компоненты скорости $u(\varphi, \lambda, z, t)$ в любой точке с географическими координатами $(\varphi, \lambda) \in \Omega_A$ при произвольном значении глубины z . Вертикальная составляющая скорости течения вычисляется из уравнения неразрывности. Полагается, что движение воды обуславливается тангенциальным напряжением ветра над Ω_A , наклонами поверхности моря, вызванными сгонами и нагонами вод в результате неравномерности ветра с учетом влияния берегов и речного стока. Движущие силы уравновешиваются вертикальной вязкостью и трением о дно. Коэффициент турбулентной вязкости вычисляется по формуле $\nu = 0.25 aWH / k$, где W - скорость ветра, H - глубина, k - ветровой коэффициент, a - коэффициент пропорциональности.

Основные уравнения блока MSF имеют вид:

$$u_\varphi = T_\varphi (H - z) / \nu + (g\rho_o / \nu) \cdot 0.5(H^2 - z^2) \cdot (\partial \kappa / \partial \varphi),$$

$$u_\lambda = T_\lambda (H - z) / \nu + (g\rho_o / \nu) \cdot 0.5(H^2 - z^2) \cdot (\partial \kappa / \partial \lambda),$$

$$\partial \kappa / \partial \varphi = - 3T_\varphi / (2g\rho_o H) - 3\nu / (g\rho_o H^3) \cdot (\partial \psi / \partial \lambda),$$

$$\partial \kappa / \partial \lambda = - 3T_\lambda / (2g\rho_o H) - 3\nu / (g\rho_o H^3) \cdot (\partial \psi / \partial \varphi),$$

где g - ускорение силы тяжести, ρ_o - средняя по Ω плотность воды, $T(T_\varphi, T_\lambda)$ - вектор тангенциального напряжения ветра на поверхности моря, κ - отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности бассейна, ψ - функция полных потоков.

Блок MTS имитирует пространственно - временную структуру распределения солености S и температуры τ морской воды. Акватория Ω_A делится на компартмента Ω_i ($\cup \Omega_i = \Omega_A$), являющиеся внутренне однородными по S и τ . Перенос тепла и соли между Ω_i осуществляется течениями и за счет разности градиентов. Обменные процессы на границе с атмосферой описываются линейными соотношениями с учетом многолетних данных наблюдений.

Для аппроксимации вертикальных вариаций плотности $\rho(\phi, \lambda, z, t)$ воды в Аральском море использовалась линейная модель MWD. Блок SCT проверяет критерий устойчивости стратификации вод и на основе этого осуществляет процедуру конвективного перемешивания водной массы. Стратификация считается устойчивой при $\partial\rho/\partial z \geq 0$. В этом случае конвективное перемешивание отсутствует. В случае $\partial\rho/\partial z < 0$ стратификация считается неустойчивой, и процесс конвективного перемешивания отождествляется с процедурой усреднения S и τ между соприкасающимися слоями воды.

Адаптация ИМГПАМ осуществлялась блоком RCR на основе данных многолетних измерений с научно-исследовательского судна “Отто Шмидт”, проводившихся Государственным Океанографическим Институтом Росгидромета (Бортник и др., 1994). Измерения проводились в безледный период по части Ω_A в течение 10 дней 3 раза за сезон по нескольким горизонтам с точностью 0.01 °C для τ и 0.01 ‰ для S . Для коррекции полученных измерений с целью приведения их к среднесуточным величинам использовались поправки из табл. 3.6.

Таблица 3.6. Поправки к измеренным значениям температуры воды (τ , °C) при моделировании гидрофизических полей Аральского моря.

Глубина (м)	Время суток при проведении измерений (часы)			
	7-13	13-18	18-23	23-7
<i>Открытые акватории Аральского моря</i>				
0	0	-1,5	0	1,5
5	0	-0,5	0	0,5
≥ 10	0	0	0	0
<i>Прибрежные акватории Аральского моря</i>				
0				5
5	0	-1,5	0	1,5
10	0	-0,5	0	0,5

Исключение случайных флюктуационных составляющих в измеренных величинах и приведение их к сопоставимому с результатами моделирования виду осуществлялось усреднением и оценкой следующих характеристик: среднего значения S по глубине, глубины залегания термоклин и температуры на этой глубине, вариации и средних значений температуры воды над и под термоклином. Параметрическая адаптация ИМГПАМ к этим значениям оценивалась по минимуму среднего квадратического отклонения. Результатом окончания процесса адаптации явились карты-схемы распределений всех компонентов модели по Ω_A , которые использовались как начальные данные для прогноза до следующего измерения. Адаптация ИМГПАМ проводилась с использованием метода альтернативной адаптации. В табл. 3.7 синтезированы этапы адаптации и дана краткая характеристика этого процесса.

Для проведения имитационных экспериментов были выбраны два периода функционирования аквагеосистемы Аральского моря: 1981 г. при наличии речного стока в море и 1989 г. при его отсутствии. Значения параметров ИМГПАМ, принимавшиеся при этом, представлены в табл. 3.8. Приведенные оценки коэффициентов турбулентного обмена теплом ($v_{\tau,\phi\lambda}$, $v_{\tau,z}$) и солью ($v_{S,\phi\lambda}$, $v_{S,z}$) получены как результат адаптации модели.

Толщина верхнего квазиоднородного слоя h задавалась равной 15 м для западной глубоководной впадины и 10 м для центральной зоны и Малого моря.

Таблица 3.7. Характеристика алгоритма адаптации ИМГПАМ, реализованного в блоке RCR.

Уровень приоритета адаптации	Содержание процесса адаптации
1	Коррекция вертикальной составляющей коэффициентов турбулентного обмена для τ и S ($v_{\tau,z}$, $v_{S,z}$).
2	Коррекция горизонтальной составляющей коэффициентов турбулентного обмена для τ и S ($v_{\tau,\phi\lambda}$, $v_{S,\phi\lambda}$).
3	Изменение t_w .
4	Коррекция среднего значения теплового баланса на поверхности моря.
5	Коррекция среднего значения водного баланса на поверхности моря.
6	Коррекция $S(\phi,\lambda,z,t)$.

Таблица 3.8. Оценки параметров ИМГПАМ, принимавшиеся при имитационных экспериментах.

Параметр	Оценки параметров в зависимости от времени	
	1981 г.	1989 г.
a , г/м ³	$3,25 \cdot 10^{-6}$	$3,25 \cdot 10^{-6}$
k	0,015	0,015
$\Delta\phi, \Delta\lambda$, км	2	1
Δt , мин	60	30
W , м/с	5,5	5,5
$v_{\tau,\phi\lambda}$, м ² /с	10^3	$0,5 \cdot 10^3$
$v_{S,\phi\lambda}$, м ² /с	$0,5 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^3$
$v_{\tau,z}$, $v_{S,z}$ ($z < h$), см ² /с	0,5	0,4
$v_{\tau,z}$, $v_{S,z}$ ($z \geq h$), см ² /с	1,5	1,2

Представленные на рис. 3.10 и в табл. 3.9 результаты имитационных экспериментов показывают эффективность ИМГПАМ как элемента системы мониторинга Арала в условиях наличия или отсутствия стока рек Амударья и Сырдарья. В среднем ИМГПАМ восстанавливает пространственное распределение S и τ с относительной погрешностью до 10% и дает прогнозную оценку этих распределений на 2 месяца с относительной погрешностью до 15%. При этом измерения *on-site* августа. В остальные моменты времени ИМГПАМ обеспечит с указанными точностями оценки всех гидрофизических параметров на Ω_A . Таким образом, ИМГПАМ под управлением ГИМС обеспечивает приемлемую для практических целей точность и допускает включение ее в качестве элемента структуры системы мониторинга более высокого уровня. Адаптация ИМГПАМ к этой функции осуществляется путем согласования форматов ее входов и выходов с соответствующими форматами ГИМС.

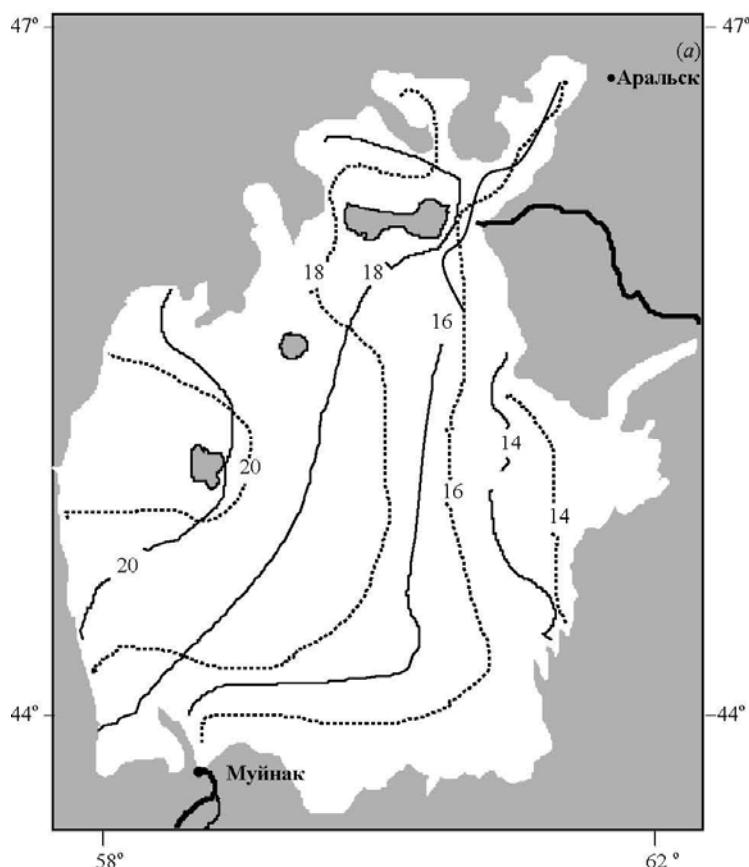


Рис. 3.10 (а) сопоставление результатов прогноза (сплошные кривые) температуры ($^{\circ}\text{C}$) и солености (‰) воды в Аральском море с экспедиционными измерениями (пунктирные кривые) в октябре 1981 г.

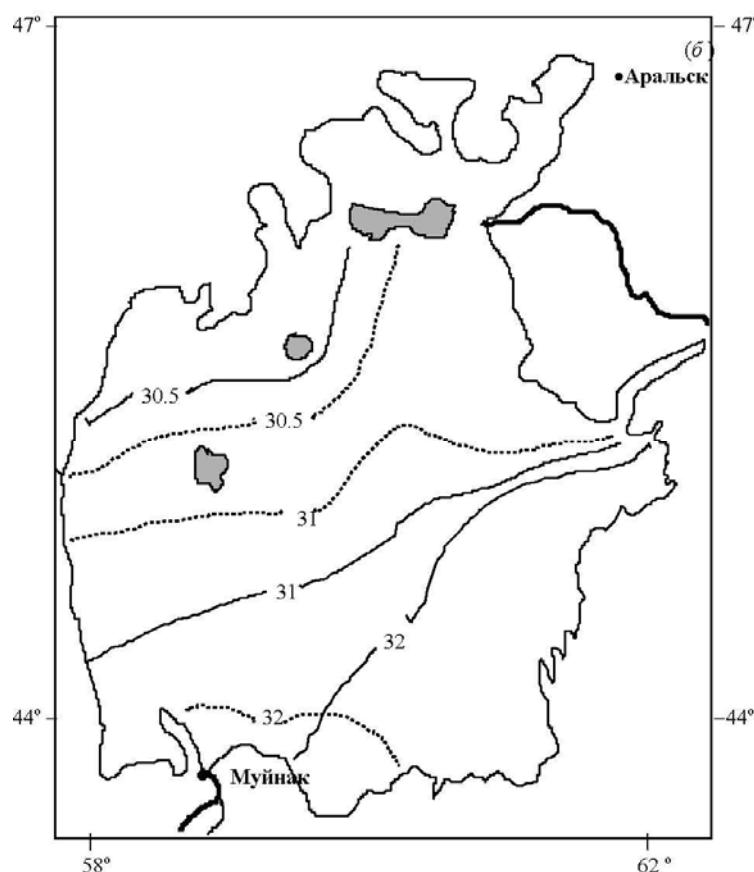


Рис. 3.10 (б) сопоставление результатов прогноза (сплошные кривые) температуры ($^{\circ}\text{C}$) и солености (‰) воды в Аральском море с экспедиционными измерениями (пунктирные кривые) в октябре 1989 г. .

Таблица 3.9. Сопоставление экспедиционных измерений с результатами имитационных экспериментов на примере вертикальных разрезов распределения температуры t ($^{\circ}\text{C}$) в сентябре - октябре 1981 и 1989 гг.

Глубина (м)	1981 г.			1989 г.		
	Измеренные значения	Результат адаптации	Прогноз	Измерен- ные значения	Резуль-тат адап- тации	Прогноз
<i>Западная глубоководная впадина</i>						
0	19,6	19,5	20,0	16,3	16,5	16,5
5	19,5	19,5	19,5	17,5	17,5	17,8
10	19,4	19,5	19,5	17,4	17,3	17,8
15	19,3	19,0	19,5	17,5	17,3	17,6
20	19,2	19,0	19,5	17,5	17,3	17,6
25	14,3	16,0	17,0	17,5	17,3	17,2
30	6,7	8,0	9,0	17,5	17,3	17,1
40	4,5	6,0	6,0	15,7	15,5	15,3
50	1,5	3,0	4,0	15,7	15,5	15,3
<i>Центральная зона</i>						
0	18,3	18,4	18,4	13,5	13,0	13,0
5	18,3	18,4	18,0	13,7	13,0	13,0
10	18,1	18,0	18,0	14,0	13,0	13,5
15	18,0	18,0	18,0	14,0	13,5	13,5

3.4.2. Модель регионального водного баланса зоны влияния Аральской аквагеосистемы

Условная схема водного баланса зоны влияния Каспийского и Аральского морей представлена на рис. 3.11. Для разработки компьютерного аналога схемы рис. 3.11 примем географическую сетку дискретизации территории региона Ξ на квазиоднородные участки Ξ_{ij} с размерами $\Delta\varphi$ по широте и $\Delta\lambda$ по долготе, где величины $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ являются свободными параметрами, выбираемыми в соответствии с базой данных. Каждый участок Ξ_{ij} характеризуется типом флористического фона α_{ij} и почвы β_{ij} , поверхностным увлажнением Φ_{ij} и глубиной залегания грунтовых вод M_{ij} . Проектирование сетки $\Delta\varphi \times \Delta\lambda$ на карту территории Ξ дает совокупность геофизически неоднородных объектов, обменные процессы водой между которыми подчинены балансовых соотношениям в соответствии со схемой рис. 3.11. В каждой ячейке Ξ_{ij} площадью σ_{ij} функционирование рассматриваемой системы представляется подмножеством потоков $\{H_k\}$, выделяемым матричными идентификаторами $\{A_s\}$ (табл. 3.10), которые согласно ГИМС- технологии отражают информационную структуру базы данных.

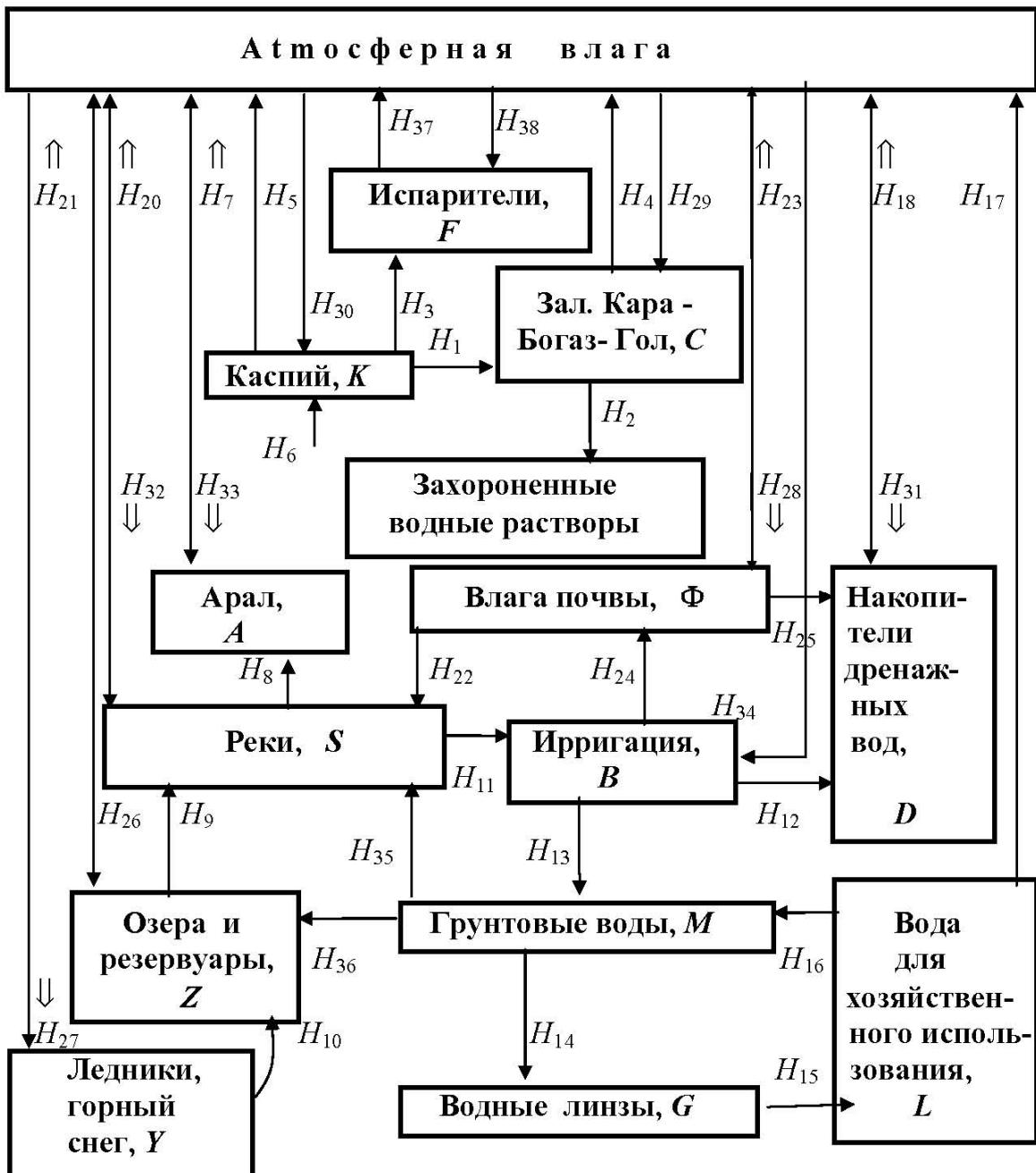


Рис. 3.11. Блок-схема потоковой диаграммы водного баланса Каспийско-Аральской аквагеосистемы, реализуемая в ИМГПАМ. Обозначения расшифровываются в табл. 3.11

Таблица 3.10. Совокупность основных матричных идентификаторов ИМГПАМ.

Идентификатор	Описание идентификатора
A_1	Выделение территории Ξ ; $A_1 = a_{ij}^1 $, $a_{ij}^1 = 0$ при $(\varphi, \lambda) \notin \Xi$, $a_{ij}^1 = a_1$ при $(\varphi, \lambda) \in \Xi$; $a_1 = 1$ для Аральского моря, 2 для Каспийского моря, 3 для залива КБГ, 4 для солончаков, 5 для рек, 6 для каналов, 7 для ирригационных систем, 8 для такыров и т.д.
A_k	Среднестатистические данные о скорости ветра ($k=2$), температуре атмосферы ($k=3$), осадках ($k=4$) и направлении ветра ($k=5$).
A_6	Начальные данные для всех компонентов модели.
A_7	Рельеф территории Ξ с учетом сетки $\Delta\varphi \times \Delta\lambda$ (абсолютный уровень).
A_8	Классификация Ξ_{ij} как искусственных испарителей ($a_{ij}^8 = 1$ для 'да', $a_{ij}^8 = 0$ для 'нет') и как областей с принудительными осадками ($a_{ij}^8 = 2$ для 'да', $a_{ij}^8 = 0$ для 'нет').

В обобщенном виде балансовые уравнения движения влаги в Ξ_{ij} имеют вид:

$$\sigma_{ij} \left(\frac{\partial W_{ij}}{\partial t} + v_\varphi \frac{\partial W_{ij}}{\partial \varphi} + v_\lambda \frac{\partial W_{ij}}{\partial \lambda} \right) = \sum_{s \in I_{ij}} H_s^{ij} - \sum_{s \in J_{ij}} H_s^{ij} \quad (3.34)$$

$$\sigma_{ij} \frac{dE_{ij}}{dt} = \sum_{s=1}^{38} (\omega_s - \gamma_s) H_s^{ij} \quad (3.35)$$

$$\frac{dL_{ij}}{dt} = H_{15}^{ij} - H_{16}^{ij} - H_{17}^{ij} \quad (3.36)$$

где $I_{i,j}$ и $J_{i,j}$ - целочисленные множества индексов потоков $H_k^{i,j}$, соответствующих процессам испарения и осадков на $\Xi_{i,j}$; $E=(A,B,C,D,K,S,F,M,Z,Y,G,\Phi)$; ω_i ($i=1\div 5$) - идентификаторы водных объектов, согласующие уравнения водного баланса со схемой рис. 3.11 (например, $\omega_1=0$ при $E\neq B$ и $\omega_1=1$ при $E=B$ и т.п.). Функции W, E, M, G, Y и Φ измеряются в линейных единицах столба жидкости, остальные функции имеют размерность в объемных единицах.

Для описания потоков H_k ($k=1\div 38$) используем разработанные многими авторами модели, параметрические зависимости, табличные и графические функции. Испарение с поверхности почвы параметризуется формулами Хикокса, Хортонса и Роуэла в зависимости от желания пользователя или в соответствии с наличием в базе данных необходимой информации. Для расчетов испарения с Арала используется формула Гоптарева (Бортник, Чистяева, 1990). Испарение с других водных поверхностей описывается *RIV*-моделью: $H_s = \mu(\theta)(\rho_w - \rho_2)$ ($s \in I$), где $\mu(\theta)$ - показатель влияния ветра на испарение, ρ_w - упругость водяного пара при температуре испаряющей поверхности (мб), ρ_2 - абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м (мб).

Взаимосвязь между поверхностными потоками воды и грунтовыми водами описывается моделями Браса, Хортонса и Хаген-Поиссевиля. Вообще учет влияния грунтовых вод в зоне Аральского моря детально изучен. В данном случае отсутствие достоверных данных о подпитке Арала грунтовыми водами вынуждает ввести только поток H_{35} . Считается, что на глубину залегания грунтовых вод влияние оказывают в основном антропогенные факторы согласно схеме рис. 3.11. При этом уровень грунтовых вод различен для разных типов грунтов: в песчаных отложениях - 2÷2.25 м; в глинистых - 3.5 ÷ 4 м. В качестве одной из моделей водного баланса грунтового горизонта использовалась формула: $H_{14} = Q_1 + \mu \cdot \Delta M \cdot \sigma / \Delta t + Q_2$, где Q_1 - переток из напорных горизонтов, Q_2 - результирующая горизонтального расхода грунтового горизонта, μ - водоотдача грунтового горизонта, ΔM - понижение за промежуток времени Δt .

На схеме рис. 3.11 нет испарения грунтовых вод. Считается, что этот поток в целом по рассматриваемому горизонту не вносит ощутимого воздействия на водный баланс и поэтому он как-бы распределен между потоками H_{14} , H_{15} , H_{35} и H_{36} . По имеющимся оценкам величина испарения грунтовых вод колеблется в диапазоне 0.1 ÷ 1.3 л·сек⁻¹·км⁻². Согласно прогнозам, сделанным рядом авторов (Арипов, 1973; Бортник, Даулетияров, 1985), дальнейшее состояние уровня грунтовых вод будет находиться на стабильных уровнях.

Схема переноса влаги в системе почва-растительность-атмосфера принята согласно алгоритму Хардингса. Учет топографии местности и ее влияние на динамику почвенной влаги в рамках принятой географической сетки выполнен согласно методике Будда (Bras, 1990). Сопоставление точности конкретных формул для расчета численных значений коэффициентов в уравнениях (3.34) - (3.33) обсуждается в работах Krapivin, Phillips (2001) и Bras (1990). Параметризация потоков H_k и управление имитационным экспериментом выполняется комплексом программного обеспечения, охарактеризованным в табл. 3.12. Примерная схема функционирования модели в режиме диалога с пользователем состоит в

следующем. В режиме мониторинга начальные данные и изменяющиеся параметры модели корректируются с возможно изменяющимся интервалом времени Δt , так что в моменты $t_i = t_0 + i \Delta t$ осуществляется сопоставление измеренных и модельных величин, на основе чего выполняется либо коррекция модели, либо изменяется Δt . отождествление полученных в результате имитации данных с геофизическими, экологическими и гидрологическими параметрами выполняется по соответствующим алгоритмам, описанным в других главах.

Таблица 3.11. Программное обеспечение ИМГПАМ.

Блок модели	Характеристика блока
<i>STANDARD</i>	Калибровка и масштабирование входной информации.
<i>FILTER</i>	Фильтрация входных данных.
<i>APPROX</i>	Реконструкция двумерных распределений в виде карто-схем за счет интерполяции измерений по пространству.
<i>EULER</i>	Эйлеровская модель переноса атмосферной влаги.
<i>CHOICE</i>	Интерфейс с базой данных.
<i>FLOWS</i>	Параметрические описания потоков H_k ($k=1,\dots,38$).
<i>SCENAR</i>	Синтез сценариев.
<i>MAP</i>	Картографическое представление результатов имитационных экспериментов.
<i>IBMMEN</i>	Привязка структуры $\{\Xi_{ij}\}$ к географической карте с помощью идентификаторов $\{A_i\}$.
<i>PROC</i>	Блок контроля за ходом имитационного эксперимента и управления формами визуального представления его результатов.
<i>ARAL</i>	Модель гидрофизического режима Аральского моря.
<i>KBG</i>	Модель гидрофизического и гидрохимического режимов залива Кара-Богаз-Гол.

3.4.3. Модель аквагеосистемы залива Кара-Богаз-Гол

Залив Кара-Богаз-Гол является одним из уникальных природных испарителей воды Каспийского моря. До 1980 г. водно-солевой режим залива полностью определялся объемом поступающих в него вод Каспийского моря (около $21.5 \text{ км}^3 / \text{год}$). Максимальная глубина залива достигала 12 м. Сочетание климатических и внешних гидрологических условий за последние 50 лет создало тенденцию к сокращению стока из Каспийского моря до $6 \text{ км}^3 / \text{год}$ в 1939 г. Объем стока после незначительных колебаний начиная с 1950 г. стабилизировался на уровне $10 \text{ км}^3/\text{год}$. В марте 1980 г. в связи с перекрытием пролива между Каспийским морем и КБГ глухой плотиной прекратилась связь залива с морем и это привело к началу новой фазы в его функционировании. В этой фазе четко прослеживается тенденция сокращения размеров водного зеркала залива, сопровождаемого уменьшающейся глубиной и ускоряющимся процессом испарения. В результате наметилось разделение бассейна залива на западную зону с глубиной около 0.5 м и восточную с глубиной 1.25 м при росте общей концентрации рассолов и существенном изменении их химического состава. В 1984 г. из-за этой тенденции начались работы по мониторингу зоны влияния КБГ, результаты которых вошли в упоминавшуюся выше базу данных. Было установлено, что котловина залива постепенно заполнялась лагунными отложениями и к 1995 г. образовался 40-метровый солевой пласт. В настоящее время котловина залива готова служить мощным испарителем каспийской воды, если осуществить ее переброску естественным путем. Конечно, за это время возникли дополнительные проблемы, связанные с возможным возникновением нежелательных геохимических процессов при переброске каспийской воды в КБГ.

Пусть φ - широта, λ - долгота географической точки в заливе, $(\varphi, \lambda) \in \Omega_g$, где $\Omega_g \subset \Xi$ - пространство залива. Обозначим через $v = (v_\varphi, v_\lambda)$ - вектор скорости ветра, $V = (V_\varphi, V_\lambda)$ - вектор скорости течения, $S_g(\varphi, \lambda, t)$ - концентрацию солей в атмосфере ($\text{мг}/\text{м}^2$), $B_g(\varphi, \lambda, t)$ - концентрацию рапы ($\text{мг}/\text{м}^2$), $H_g(\varphi, \lambda, t)$ - концентрацию осажденных солей ($\text{мг}/\text{м}^2$). Тогда кинетические уравнения с учетом схемы рис. 3.12 запишутся в виде:

$$\partial S_g / \partial t + v_\varphi \partial S_g / \partial \varphi + v_\lambda \partial S_g / \partial \lambda = C_1 + C_2 + C_{10} - C_3 - C_4 - C_7,$$

$$\partial B_g / \partial t + V_\varphi \partial B_g / \partial \varphi + V_\lambda \partial B_g / \partial \lambda = C_3 + C_4 + C_8 - C_1 - C_2 - C_5 + C_6,$$

$$\partial H_g / \partial t = C_5 - C_6 - C_9$$

Таблица 3.12. Потоки воды в структуре рис. 3.9

Поток	Идентификатор потока
Сток из Каспия в залив КБГ	H_1
Погребенные растворы	H_2
Искусственные испарители	H_3
Испарение с поверхности:	
залива КБГ	H_4
Каспийского моря	H_5
Аральского моря	H_7
накопителей дренажных вод	H_{18}
оросительных систем	H_{19}
рек Амудары и Сырдарьи	H_{20}
озер и водохранилищ	H_{21}
почвы	H_{23}
искусственных испарителей	H_{37}
Речной сток:	
в Каспийское море	H_6
в Аральское море	H_8
Подпитка рек Амудары и Сырдарьи за счет озер и водохранилищ	H_9
Таяние ледников и снежников	H_{10}
Расходы воды на орошение	H_{24}
Поступление воды в накопители дренажных вод	H_{12}
Утечка из оросительных систем	H_{13}
Накопление воды в линзах	H_{14}
Изъятие воды из линз на хозяйствственные нужды	H_{15}
Возвратные воды	H_{16}, H_{17}
Забор воды в оросительные системы	H_{11}
Поверхностный сток в реки	H_{22}
Поверхностный сток с орошаемых территорий	H_{25}
Осадки на:	
озера и водохранилища	H_{26}
ледники и снежники	H_{27}
почву	H_{28}
залив Кара-Богаз-Гол	H_{29}
Каспийское море	H_{30}
накопители дренажных вод	H_{31}
реки Амударья и Сырдарья	H_{32}
Аральское море	H_{33}
оросительные системы	H_{34}
искусственные испарители	H_{38}
Подпитка водоемов за счет грунтовых вод	H_{36}
Подпитка рек за счет грунтовых вод	H_{35}

Потоки C_i ($i=1 \dots 10$) представлены на рис. 3.12 и являются функциями времени, температуры и осадков.

Функциональные зависимости потоков C_i от параметров модели и времени t представим в следующем виде:

$$C_1 = \min \{ \lambda_1 \theta_1^{\Delta T + \Delta W}, C_1^{\max} \}, C_3 = a S_g, C_4 = b S_g H_{29}, C_{10} = C_{10}(t),$$

$$C_9 = f(t), C_8 = F(t), C_1^{\max} = 20 H_4, C_7 = \lambda_3 S_g \theta_3^{\Delta v}, C_8 = F(t),$$

$$C_2 = \begin{cases} 0 & \text{для влажной рапы,} \\ \lambda_2 \theta^{\Delta v} & \text{при высохшей рапе.} \end{cases} \quad C_5 = \begin{cases} \beta (B_g - B_{g0}) & \text{при } B_g > B_{g0}, \\ 0 & \text{при } B_g \leq B_{g0}. \end{cases}$$

$$C_6 = \begin{cases} 0 & \text{для } H_g = 0, \\ \lambda_4 \exp[\lambda_6 \Delta T - \lambda_5 B_g] & \text{для } H_g > 0. \end{cases}$$

где B_0 - концентрация насыщенного раствора, $\Delta T = T_0 - T$, T_0 контрольная температура воды, $\Delta v = v_0 - v$, v_0 - контрольная скорость ветра, функции f и F даются в форме эмпирических оценок (рис. 3.13), $C_{10}(t)$ - сценарий, описывающий предысторию поступления солей из Каспийского моря; a , b , β , θ_i и λ_i - постоянные коэффициенты модели.



Рис. 3.12. Принципиальная схема потоков соли в зоне влияния залива Кара-Богаз Гол

Скорость ветра v и температура T задаются в виде карт в соответствии с шагами пространственной сетки ($\Delta\phi, \Delta\lambda$). Значения температуры рассчитываются по формуле: $T_w = A(t) + B(t)T_a$, где T_a - температура воздуха, T_w - температура водной поверхности, коэффициенты A и B определяются величинами:

$$A(t) = \begin{cases} 1.32 \pm 0.04 & \text{для апреля - сентября,} \\ 3.26 \pm 0.06 & \text{для октября - марта,} \end{cases} \quad B(t) = \begin{cases} 0.86 \pm 0.02 & \text{для апреля - сентября,} \\ 0.88 \pm 0.06 & \text{для октября - марта.} \end{cases}$$

Уравнение водного баланса (7.34) для территории Ω_g можно записать в следующем виде:

$$\sigma_g \partial W / \partial t = E - R + \sum_{j=1}^N (H_{4j} - H_{29j} \sigma_{gj}),$$

$$\sigma_{gj} \partial c_i / \partial t = H_{1i} - H_{4i} + B_i \sigma_{gj} + K_i + N_i - H_{2i},$$

где σ_g - площадь залива, σ_{gj} - площадь j -ой акватории залива в соответствии с сеткой дискретизации. Остальные обозначения даны на схеме рис. 3.11.

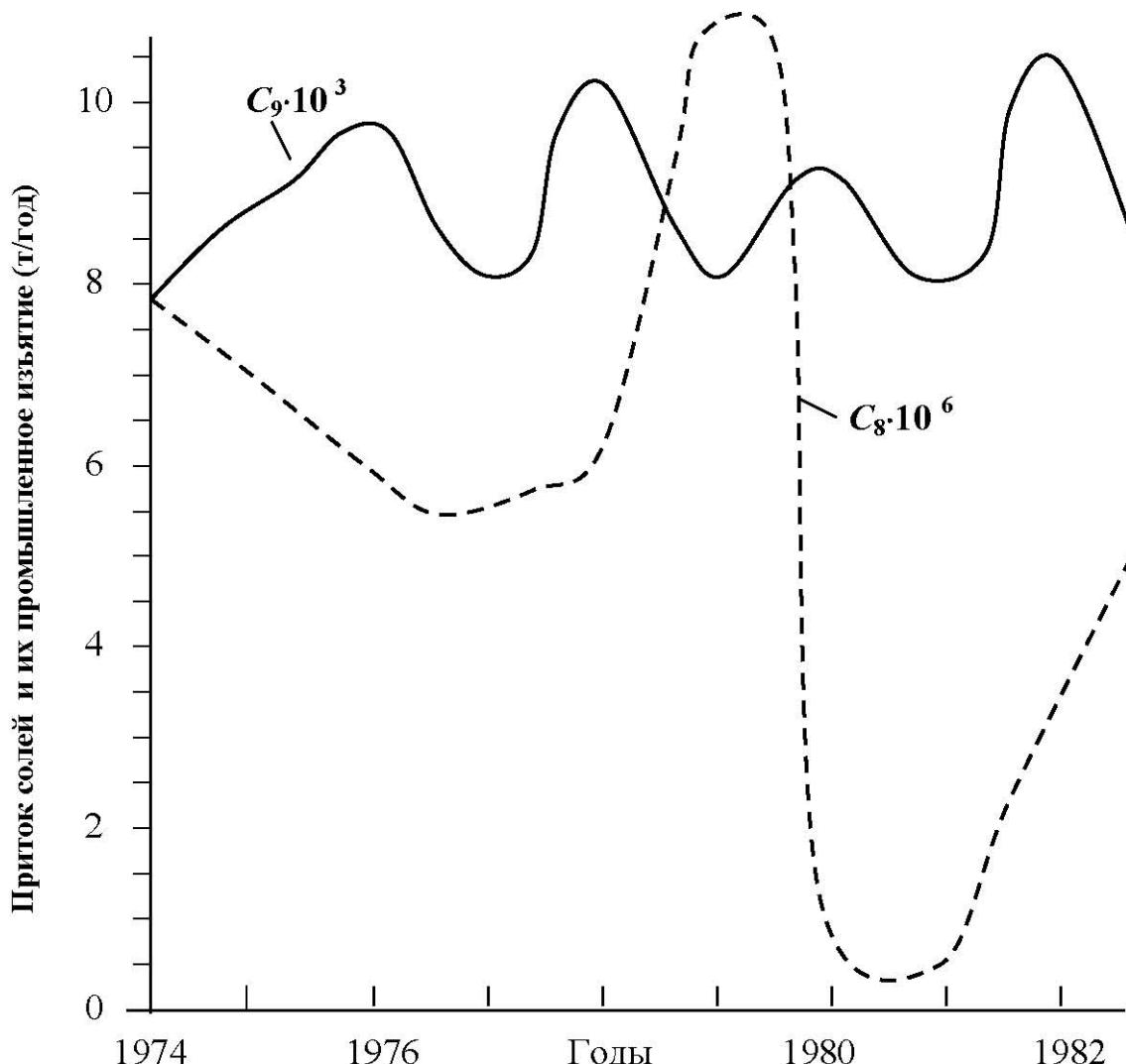


Рис. 3.13. Приток солей в зал. Кара-Богаз Гол (C_8) и их промышленное изъятие (C_9)

3.4.4. Параметризация составляющих водного баланса Приаралья

Описанная выше совокупность моделей позволяет свести в единую систему все потоки влаги, которые могут циркулировать на территории Приаралья и которые могут приходить через ее границу. Как видно из схемы рис. 3.14 для вычислительного эксперимента на основе этой системы моделей требуется большой объем данных. Сократить этот объем можно за счет учета многочисленных корреляций, построенных многими авторами для описания связей между геофизическими параметрами и элементами водного баланса региона. Наиболее глубокий анализ таких связей отражен в работе Бортника и Чистяевой (1990).

В настоящее время Аральское море является бессточным замкнутым водоемом и уравнение его водного баланса на этом этапе становится достаточно простым:

$$H_8 / \sigma + H_{33} + U_n - H_7 - U_\Phi / \sigma = \Delta A,$$

где U_n - подземный приток вод, U_Φ - фильтрация морских вод в грунт дна берегов, σ - площадь моря. При адаптации схемы общего регионального водного баланса к условиям Приаралья составляющие U_n и U_Φ были включены в потоки H_{35} и H_{11} для упрощения требований к базе данных и как имеющие незначительный вес по сравнению с другими потоками воды.



Рис. 3.14 . Принципиальная схема водных потоков в зоне влияния зал. Кара-Богаз-Гол.

Вопрос о роли подземного расхода воды в водном балансе непосредственно самого Арала обсуждается многими авторами. По оценкам Черненко (1981) существует прямая связь между поступлением подземных вод и уровнем моря. Он провел расчеты расхода подземных вод, разгружающихся в море, и получил зависимость $U_n \sigma = 5.5 + 0.5 \Delta A$ ($\text{км}^3/\text{год}$), где ΔA - изменение уровня Арала в метрах. Отсюда следовало, что, например, при 12-ти метровом понижении уровня Арала поступление подземных вод должно достичь $11.5 \text{ км}^3/\text{год}$, что не имеет места. Поэтому учет этой компоненты в рассматриваемой здесь модели выполнен в форме сценария, полагающего, что поток $U_n = \text{const}$ ($6.3 - 7.2 \text{ м}^3/\text{с}$). При расчете части потока H_8 , относящегося к стоку Амударьи используем уравнение $\Delta H_8 = 0.52 Y_a - 14.21$, где Y_a - объем стока на разрезе кишлака Чатлы.

Важное для точности оценки водного баланса уравнение испарения с поверхности моря было изучено многими авторами. Так упоминавшаяся формула Н.П.Гоптарева имеет вид: $H_7 = K(e_s - e_z)U_z$, где e_s - максимальное парциальное давление водяного пара (гПа) при температуре воды поверхности моря (или льда) с учетом ее солености; e_z - парциальное давление водяного пара (гПа) в атмосфере на высоте 2м; U_z - скорость ветра (м/с) на высоте z (м); $K = 327.5 / (\ln^* z - \ln^* z_0)^2$; z_0 - параметр шероховатости ($\approx 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$); $\ln^* z = \ln z + az + (az)^2 / (2 \cdot 2!) + \dots + (az)^n / (n \cdot n!)$. Параметр a выбирается из условия наилучшего учета влияния температурной стратификации нижнего слоя атмосферы на скорость испарения.

3.5. Имитационные эксперименты и прогнозирование водного баланса котловины аральского моря

3.5.1. Сценарий направленности изменений составляющих водного баланса Арала

На рис. 3.15 схематично отражена история динамики главных элементов водного баланса Арала и сделана экстраполяция этой динамики в условиях сохранения наметившихся тенденций. Однако ясно, что методика экстраполирования данных предыдущих лет не может быть вполне объективной и тем более ответить на вопрос о возможности существования режимов воздействия на элементы водного баланса, которые бы изменили эти тенденции.

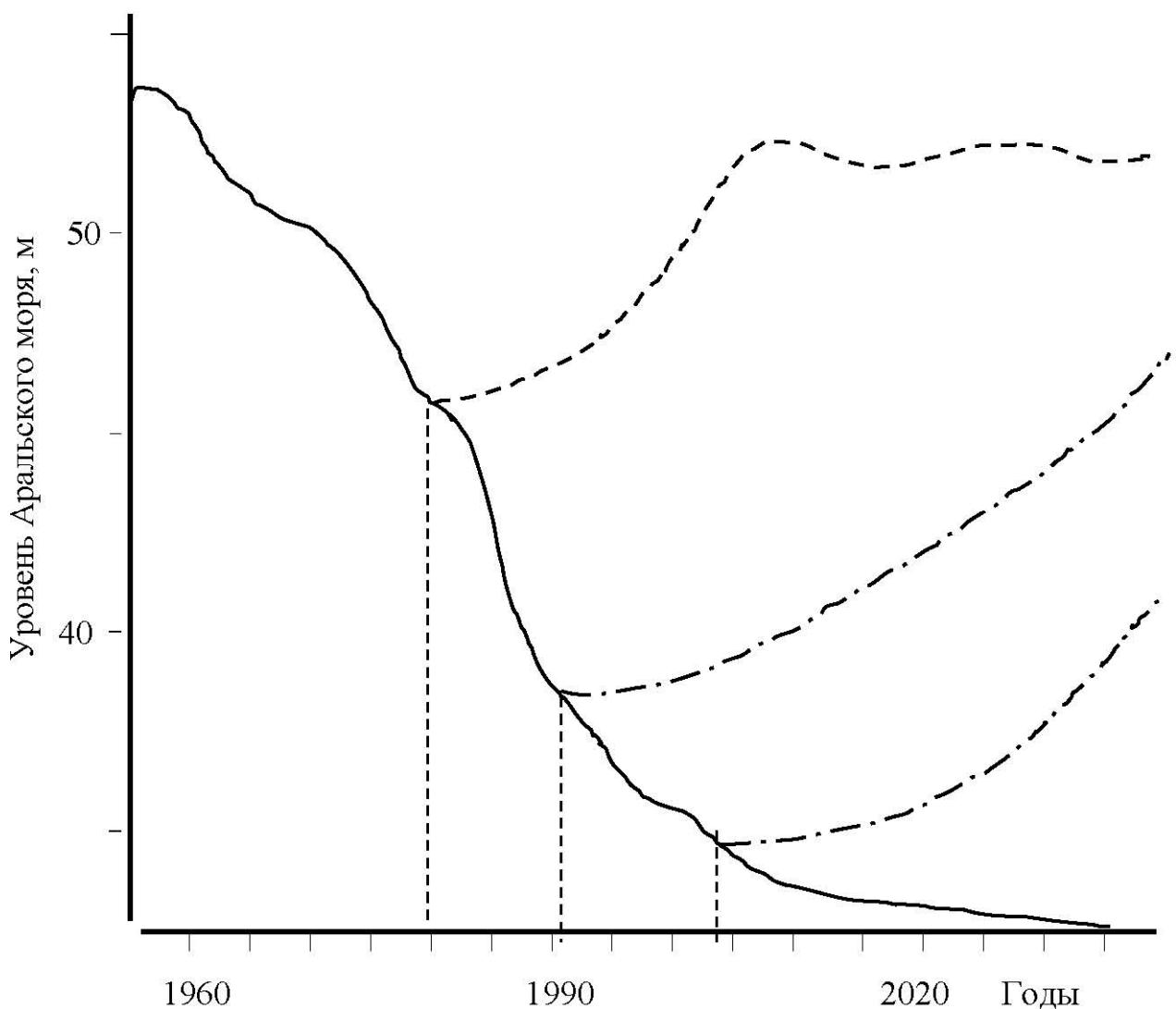


Рис.3.15 . Возможная динамика уровней Аральского моря (в метрах по отношению к уровню Мирового океана) в результате изменения времени начала реализации сценария принудительного обводнения испарителей на восточном побережье Каспийского моря (пунктирные кривые). Сплошная кривая соответствует естественной динамике уровня моря в условиях сохранения средних показателей природно-антропогенных параметров.

Проблема управления водным балансом зоны Аральского моря остается предметом многочисленных исследований и дискуссий. По мнению Михайлова (1999) восстановить Аральское море в прежнем виде невозможно, а возможна лишь стабилизация его водного режима при уровнях, близких к современным уровням без крупномасштабной реконструкции оросительных и дренажных систем. В этом пессимистическом сценарии при подаче сырдарьинской воды в объеме 3-5 км^3 / год и регулируемом сбросе вод в Большое море при дополнительном стоке 8-10 км^3 / год вод Аму-Дарьи возможно сохранить уровень Аральского моря на отметках 31-32 м.

Развитая выше модель водного баланса Аральского региона позволяет рассмотреть различные гипотетические ситуации воздействия на водный баланс территории Ξ с целью поиска способов его позитивного изменения с переводом из современного неудовлетворительного состояния в стабильный и приемлемый по народно-хозяйственным и гидрометеорологическим критериям режим функционирования. Одним из путей выхода из создавшейся критической ситуации является сокращение объемов вод, забираемых на орошение. Ясно, что ликвидировать Каракумский канал невозможно, так как с ним связаны многие сельскохозяйственные районы Средней Азии. Тем не менее, правительства

Казахстана и Узбекистана обсуждают возможность частичного сокращения хлопковых плантаций, с тем чтобы освободившиеся объемы воды вернуть в Аральское море.

Для проведения вычислительных экспериментов в качестве территории Ξ рассмотрим регион, ограниченный географическими координатами $[41^{\circ}, 47^{\circ}]N$ и $[50^{\circ}, 70^{\circ}]E$. Зададим $\Delta\varphi=\Delta\lambda=10'$. Наполнение идентификаторов $\{A_i\}$ осуществим по данным литературных источников и на основе электронной базы дистанционных данных. Для формирования множества сценариев рассмотрим гипотетические антропогенные управления водным режимом. Основная цель компьютерного эксперимента состоит в выборе такого сценария, который бы наилучшим образом обеспечивал стабильный перевод гидрологического режима территории Ξ в состояние с компенсацией приращения уровня Каспия на 14 см/год и снижением его уровня на 1 см/год, а также возрождения основных параметров Арала на уровне 1960 г.

Анализ данных динамики уровней Каспия и Арала показывает существование нарушенного равновесия в гидрологическом режиме между ними. Сложившаяся к концу 20-го столетия гидрометеорологическая ситуация на территории Ξ не может быть переведена в другое равновесное состояние без антропогенного управления. Нормализовать уровень Каспия можно за счет увеличения оттока его воды в другие резервуары. Это возможно путем принудительного изъятия каспийской воды и размещения ее в участках солончаков и впадин на восточном побережье Каспийского моря, имеющих более низкий по сравнению с морем уровень (- 25.7 м). К таким элементам прибрежного ландшафта относятся сор Мертвый Култук (- 27 м), сор Кайдак (- 31 м), котловина КБГ (- 32 м), впадины Карагие (- 132 м), Каунды (- 57 м), Карын Арык (- 31 м), Чагала-Сор - 30 м) и др. Технология переброски каспийской воды в эти участки Ξ здесь не обсуждается. Заметим лишь, что во многих случаях для этого необходимы лишь открытые каналы для самостоятельного движения воды. Конечно, здесь возникают дополнительные проблемы обеспечения устойчивости параметров окружающей среды. Например, для залива КБГ необходимо не нарушить гидрохимические процессы и рельеф дна. Для других элементов Ξ следует искать технологии переброски каспийской воды, которые обеспечивали бы опреснение солончаков и накопление в прибрежных впадинах пресной или слабо минерализованной воды.

Если указанная процедура обводнения реализована частично или полностью, то увеличивается испарение каспийской воды. Испарившаяся влага переносится на другие территории в соответствии с неуправляемой синоптической обстановкой. По многолетним данным о ветровой обстановке в западной части Ξ существуют периоды времени с устойчивой благоприятной розой ветров. Направления W , NW и SW имеют высокую повторяемость. Следовательно, атмосферный перенос каспийской воды в котловину Арала возможен в устойчивом режиме. Задача состоит в организации принудительного осаждения этой воды или оценки естественного возрастания осадков. В модели эта процедура отнесена к разряду сценария.

3.5.2. Модельная оценка динамики водного баланса Арала при сохранении природно-антропогенной обстановки в регионе

Рассмотрим сценарий реализации естественных трендов элементов водного баланса Аральского региона. Для этого дополнительно уже к принятым оценкам многих параметров зафиксируем антропогенную составляющую (поток H_{11}). Размеры современного и планируемого безвозвратного водопотребления оценены по литературным источникам и суммированы в табл. 3.13. Кроме этого важны уточнения величин испарения с водной поверхности рек и транспирации влаголюбивой растительностью в подтопляемых зонах речных долин. Чтобы уменьшить возможные неопределенности параметров моделей испарения примем оценки $H_{20} = 6 \text{ км}^3/\text{год}$ для Сыр-Дарьи и $H_{20} = 8 \text{ км}^3/\text{год}$ для Аму-Дарьи. Результаты моделирования приведены на рис. 3.16, 3.17 и в табл. 3.14. Предполагается, что одно из направлений ветра (W , NW или SW) реализуется в

течение 80 суток с повторяемостью не менее 50%. В остальное время года направления ветров определяются в соответствии с равномерным распределением.

Таблица 3.13. Расчетный уровень безвозвратного изъятия объемов воды из бассейнов рек Амударьи и Сырдарьи, $\text{км}^3/\text{год}$.

Зона бассейна	Годы			
	1985	1990	2000	2010
р. Амударья	33,4	39,0	45,0	45,0
р. Сырдарья	54,0	57,5	61,0	61,0

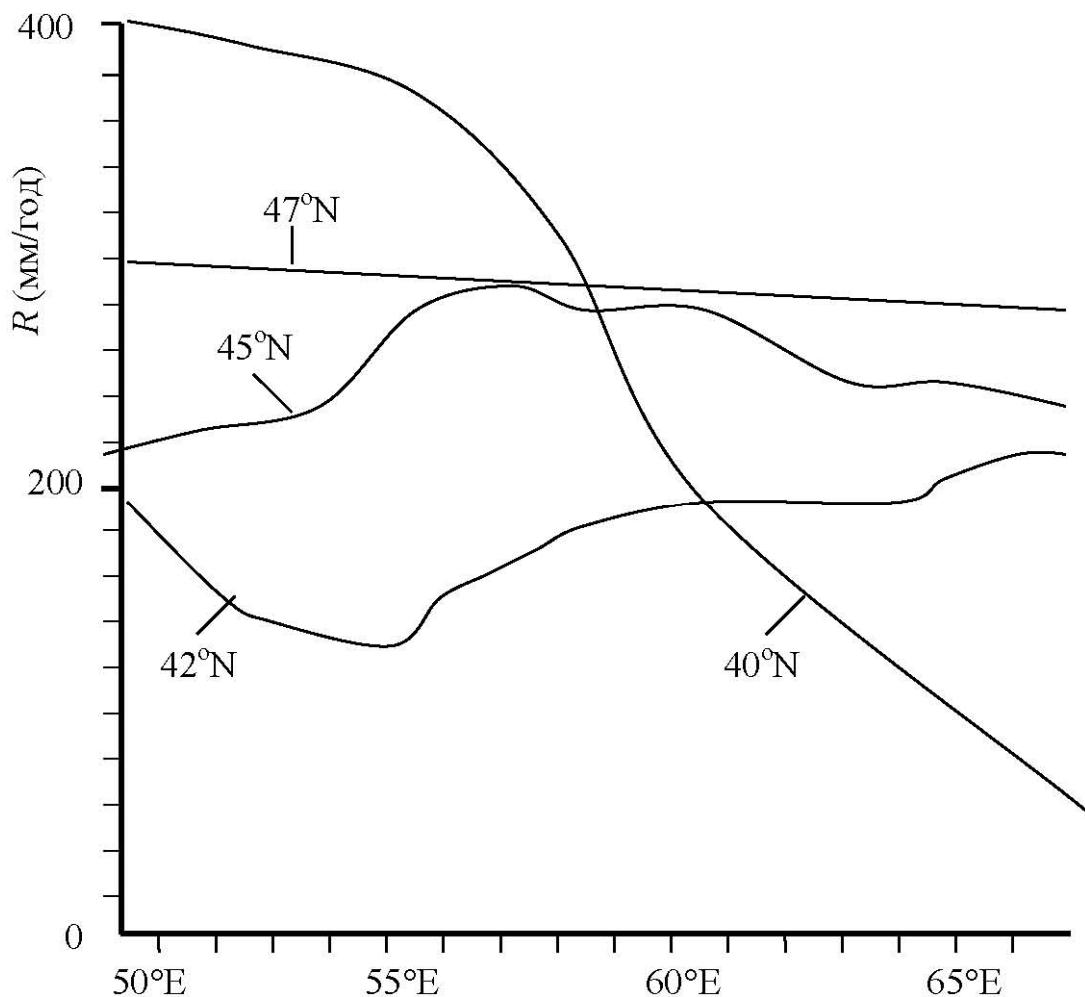


Рис.3.16. Прогноз распределения годовых сумм осадков на территории Аральско-Каспийской аквагеосистемы по широтным разрезам в 2000 г. по начальным данным 1994 г. и среднестатистической ветровой обстановке за предыдущие 5 лет. На кривых указаны градусы северной широты.

Над акваторией Каспия формируется поток атмосферной влаги $1.3 \text{ км}^3/\text{сут}$. Искусственные испарители обеспечивают дополнительно к этому потоку $0.2 \text{ км}^3/\text{сут}$. Как следует из результатов расчетов при устойчивом западном ветре за неделю искусственных дождей в район Арала поступает годовой объем осадков 1960 г., а уровень моря поднимается на 0.3 м. За 80 суток летнего периода объем Арала пополняется на 120 км^3 воды, т.е. его уровень поднимается на 3.3 м. В случае, если повторяемость W , NW и SW ветров на территории между Каспием и Аралом не менее 40% или 50% с суммарной продолжительностью 80 и более суток в году, то уровень Арала по состоянию на 1960 г. будет достигнут за 8 или 9 лет соответственно. При продолжительности этой розы ветров в 60 суток указанный результат будет достигнут только через 12-15 лет. При этом

предполагается, что повторяемость восточных ветров на Ξ не превышает 15%. Вклад избыточной атмосферной влаги с Каспия в увеличение речного стока дает около $40 \text{ км}^3/\text{год}$ с выполнением соотношения $34 < H_7 < 50 \text{ км}^3/\text{год}$.

Таблица 3.14. Результаты модельных оценок некоторых составляющих водного баланса Аральского моря при различных преобладающих направлениях ветра и в условиях реализации процедуры принудительных осадков в Туранской низменности (H_8 в $\text{км}^3/\text{год}$; H_7 и H_{33} в $\text{мм}/\text{год}$).

Время, прошедшее с начала имитационного эксперимента (года)	Преодолевающее направление ветра								
	NW			W			SW		
	H_8	H_{33}	H_7	H_8	H_{33}	H_7	H_8	H_{33}	H_7
1	38	197	1010	41	188	998	10	198	1007
2	44	180	991	37	190	987	12	183	1011
3	70	160	993	55	171	869	16	160	1004
4	56	174	968	68	183	901	21	171	1023
5	48	149	1001	50	194	977	18	152	1014
6	51	187	986	44	189	983	14	188	989
7	66	191	999	61	169	1015	16	190	1003
8	61	177	956	63	175	994	12	180	1004
9	59	163	983	52	166	899	9	171	999
10	53	154	979	57	160	908	13	155	991
11	49	142	988	55	159	910	17	143	1001
12	57	138	985	48	144	1017	11	140	973
13	52	144	987	54	147	999	8	141	966
14	55	107	1003	50	133	976	12	110	981

Как видно из рис. 3.16 в распределении осадков над восточной и центральной частями территории Ξ наблюдается устойчивое повышение осадков соответственно на 8% и 12%, что обеспечивает приведенную на рис. 3.15 динамику уровня Аральского моря. Положительный баланс влагопереноса на восточной границе Ξ возрастает на 4%, что стимулирует нарастание речного стока в Туранскую низменность. При ветрах от *SW* до *W* и *NW* количество осадков в котловине Араля инвариантно, восточный ветер оказывается в основном нейтральным или на 4-7% увеличивает количество осадков в зоне Араля за счет возвратной атмосферной влаги. Указанная инвариантность осадков обеспечивает возможность регулирования режимов обводнения засушливых территорий. В частности, при *SE* ветре избыточное испарение каспийской воды может давать запас влаги для принудительного обводнения засушливых степей в Калмыкии и Ставропольском краях.

Безусловно, здесь возникает вопрос о достоверности всех этих расчетов. Нелинейность уравнений используемых моделей не позволяет произвести какие-либо теоретические оценки устойчивости и точности имитационных модельных результатов. Также слишком многие факторы не были учтены. Поэтому в качестве подтверждения некоторого уровня достоверности представляется возможным привести сопоставление имитационных (теоретических) расчетов и опубликованных в литературе оценок параметров. Пример такого сопоставления дан на рис. 3.17. Видно, что модель достаточно правдоподобно восстанавливает историю динамики некоторых характеристик залива Карабогаз-Гол.

Сделанные расчеты дают надежду, что все же Аральское море можно восстановить или хотя бы стабилизировать, если срочно принять необходимые решения. Здесь возможен комплексный подход, включающий реализацию рассмотренного сценария обводнения некоторых территорий на восточном побережье Каспийского моря и крупномасштабную реконструкцию оросительных и дренажных систем.

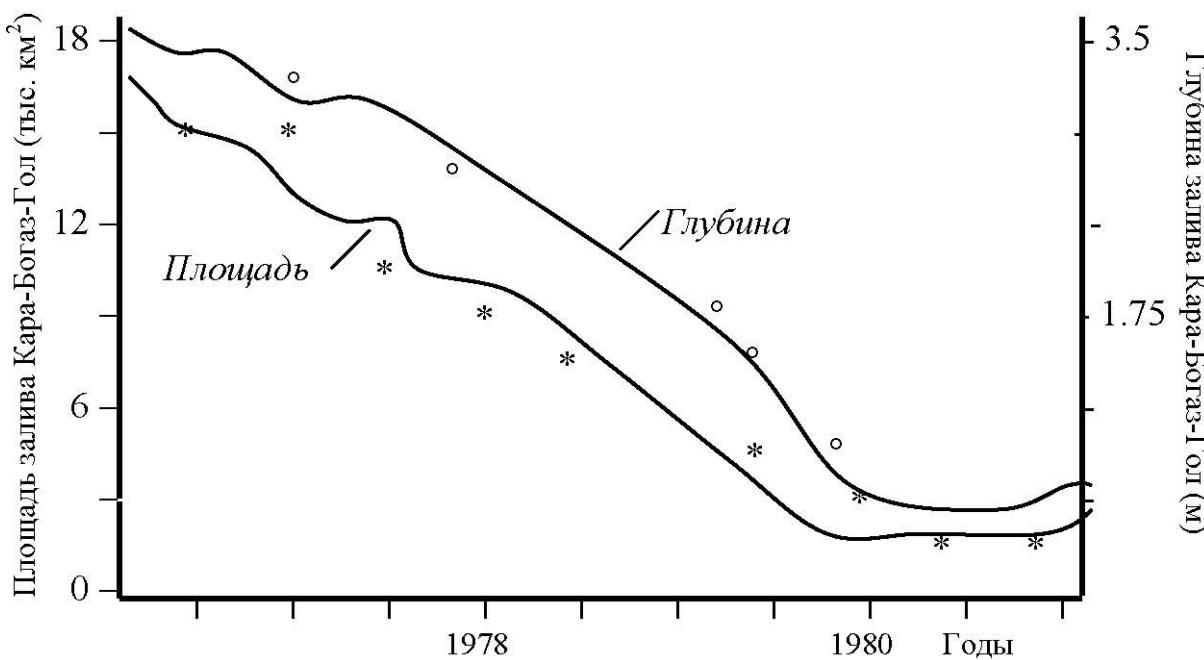


Рис. 3.17. Теоретические (сплошные кривые) и измеренные (о - глубина, * - площадь) оценки параметров аквагеосистемы зал. КБГ.

3.5.3. Рекомендации по режиму мониторинга Аральской аквагеосистемы

Как показал опыт экспедиционных работ непосредственно в Аральском регионе (Бортник, Чистяева, 1990; Бортник и др., 1994) и многолетние дистанционные исследования с помощью летающих лабораторий, проводившихся ИРЭ РАН, получение оперативной информации о геофизической и гидрометеорологической обстановке требует больших экономических затрат. Внедрение ГИМС-технологии облегчает решение задачи организации регулярного мониторинга указанного региона. Это возможно за счет согласованного использования средств наблюдения и математических моделей. По существу водный баланс всей территории, влияние которой на Аральское море является бесспорным, можно описать более простой схемой рис. 3.18. Тогда, конечно, возникает ряд дополнительных задач планирования измерений. Их решение видится в создании специализированной информационной системы, примерная схема которой показана на рис. 3.19. Эта система используется службами мониторинга зоны Арала и прилегающих территорий для экспертного сопоставления эпизодических оценок отдельных элементов водного баланса с результатами моделирования. Результатом такого сопоставления могут быть коррекции отдельных составляющих модели водного баланса или дополнительные измерения. В целом реализация схемы рис. 3.19 возможна при использовании регулярных спутниковых измерений площадей различных отмеченных в табл. 3.4 (идентификатор A₂) типов земных покровов, температуры, содержания влаги в атмосфере, скорость и направление ветра, соленость водоемов.

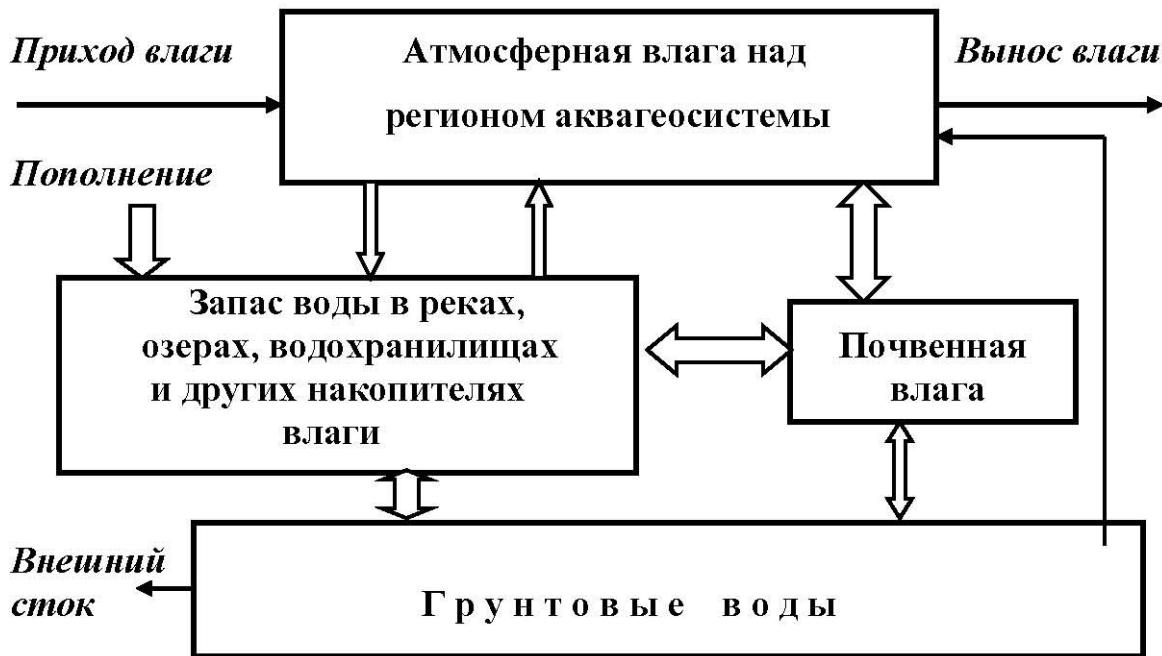


Рис. 3.18. Блок-схема модели круговорота влаги в зоне функционирования аквагеосистемы с учетом процессов испарения, эвапотранспирации, утечек, осадков и антропогенного использования.

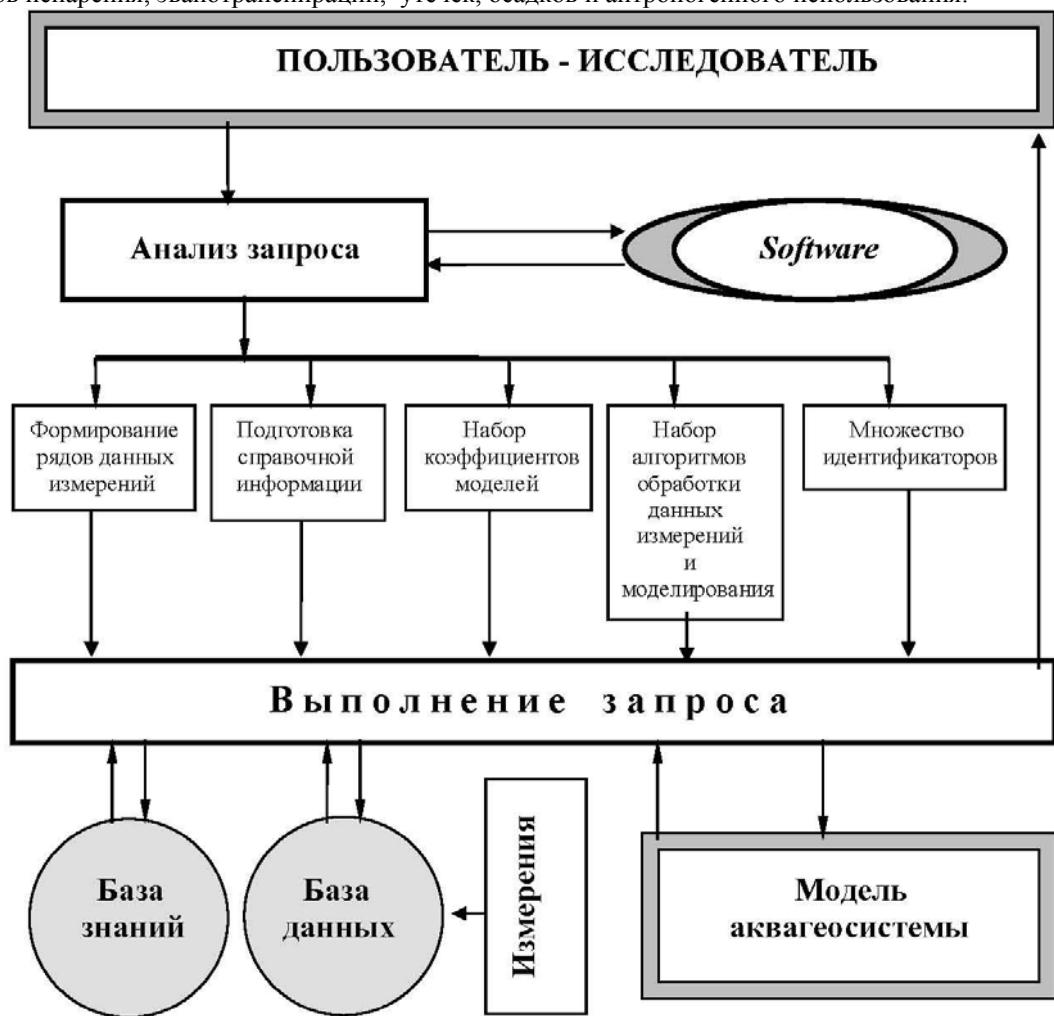


Рис. 3.19. Примерная схема диалогового режима использования алгоритмического обеспечения гидрофизического эксперимента.

Литература

- Алимов А.Ф., Дмитриев В.В., Флоринская Т.М., Хованов Н.В., Чистобаев А.И. (1999) - СПб: НЦ РАН. - 253 с.
- Арипов С.Л. (1973) Составляющие водного баланса Аральского моря и их влияние на многолетние колебания его уровня // Водные ресурсы. № 5. С. 29-40.
- Беллман Р., Дрейфус С. (1965) Прикладные задачи динамического программирования. - М.: Наука. - 457 с.
- Беллман Р., Роус Р.С. (1971) Метод анализа широкого класса биологических систем // В сб. Кибернетические проблемы бионики. М.: Мир. С. 158-169.
- Бондур В.Г., Воляк К.И. (1984) Оптический пространственный спектральный анализ изображений морской поверхности. Исследования по гидрофизике // Тр. ФИАН СССР. М.: Наука. С. 63-78.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. (2009) Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 629 с.
- Бортник В.Н., Даuletayров К.Ж. (1985) Численное моделирование циркуляции вод в Аральском море. М.: Препринт ВЦ АН СССР. 36 с.
- Бортник В.Н., Лопатина С.А., Крапивин В.Ф. (1994) Имитационная система для изучения гидрофизических полей Аральского моря // Метеорология и гидрология. № 9. С. 102-106.
- Бортник В.Н., Чистяева С.П. (1990) Аральское море. - Л.: Гидрометеоиздат. - 195 с.
- Виноградав М.Е., Крапивин В.Ф., Флейшман Б.С., Шушкина Е.А. (1975) Использование математической модели для анализа поведения океанической экосистемы в открытом регионе// Океанология. Т. 15(2). С. 313-320.
- Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Осипова В.И. (ред.) (2002) Природные опасности России: природные опасности и общество. - М.: Издательская фирма «КРУК». - 245 с.
- Глава 2 Гарагули Л.С., Еришов Э.Д. (ред.) (2000). Природные опасности России: геокриологические опасности. - М.: Издательская фирма «КРУК». - 316 с.
- Голицын Г.С., Васильев А.А. (ред.). (2001) Природные опасности России: Гидрометеорологические опасности. - М.: Издательская фирма «КРУК». - 295 с.
- Григорьев А. А., Кондратьев К.Я. (2001) Экодинамика и geopolitika. Том II: экологические катастрофы. - СПб: Изд-во НИЦ ЭБ РАН. - 688 с.
- Григорьев А. А., Кондратьев К.Я. (2004а) Глобальная урбанизация.1. Общие закономерности // Известия РГО. № 4. С. 1-8.
- Григорьев А. А., Кондратьев К.Я. (2004б) Глобальная урбанизация.2. Экодинамика больших городов// Известия РГО. №5. С. 1-11.
- Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. (2000) Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-традиция. 416 с.
- Залимханов М.Ч. (1981) Снежно-лавинный режим и перспективы освоения гор Большого Кавказа. - Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского-на-Дону гос. ун-та. - 376 с.
- Корнаков В.И., Боровец С.А., Бостанджогло А.А. и др. (1968) Водный баланс и прогноз снижения уровня Аральского моря. – Ташкент: СЛОГИДРОПОЕКТ. - 103 с.
- Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. (2002) Глобальные изменения окружающей среды: экоинформатика. – СПб: Изд-во СПб гос. ун-та. - 724 с.
- Кукса В.И. (1994) Южные моря в условиях антропогенного стресса. - СПб: Гидрометеоиздат. - 369 с.
- Ле Корбюзье (1977) Архитектура XX века. - М.: Изд-во Прогресс. - 304 с.
- Мазур И.И., Иванов О.П. (2004) Опасные природные процессы. – М.: Экономика. - 702 с.
- Малинецкий Г.Г. (2002) Сценарии, стратегические риски, информационные технологии// Информационные технологии и вычислительные системы. № 4. С. 83-108.
- Михайлов В.Н. (1999) Почему обмелело Аральское море? // Соросовский образовательный сборник. № 2. С. 85-90.

- Монин А.С., Шишкиов Ю.А. (1991) Дилеммы потепления в XX веке. В сб. Человек и стихия. СПб: Гидрометеоиздат. С. 47-49.
- Осипов В.И. (2001) Природные катастрофы на рубеже ХХI века // Наука и общество. № 4. С. 291-302.
- Погорелов А.В. (1998) Режим устойчивого снежного покрова на Большом Кавказе // Материалы гляциологических исследований. Т. 84. С. 170-175.
- Подлазов А.В. (2001) Самоорганизованная критичность и анализ риска // Известия Вузов. Прикладная нелинейная динамика. Т. 9(1). С. 49-88.
- Ремизов Л.Т. (1985) Естественные радиопомехи. – М.: Наука. - 196 с.
- Рэмсли Г. (1978) Снежные лавины в Норвегии. В кн.: Лавров С.Б., Никифорова Л.Г. (ред.). Стихийные бедствия: изучение и методы борьбы. - М.: Изд-во "Прогресс". - С. 204-211.
- Савин А.И., Бондуар В.Г. (2000) Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем// Оптика атмосферы и океана. Т. 13(1). С. 46-61.
- Глава 3 Соболев Г.А. (ред.) (2000) Природные опасности России: сейсмические опасности. – М.: Издательская фирма «КРУК». - 295 с.
- Софронов М.А., Вакуров А.Д. (1981) Огонь в лесу. – Новосибирск: Наука. - 128 с.
- Трошкина Е.С. (1992) Лавинный режим горных территорий СССР. – М.: Изд-во ВИНТИ. - 196 с.
- Чернавский Д.С. (ред.) (2004) Распознавание, аутодиагностика, мышление: синергетика и наука о человеке. - М.: Изд-во "Радиотехника". - 272 с.
- Черненко И.М. (1981) Моделирование фильтрации артезианских вод в котловину Аральского моря // Известия ВУЗов: серия Геология и Разведка. № 10. С. 82-88.
- Abrahamson D.E. (1989) Challenge of Global Warming. Island Press, Washington, 376 pp.
- Beven II J.L., Avila L.A., Blake E.S., Brown D.P., Franklin J.L., Knabb R.D., Pasch R.J., Rhome F.R., and Stewart S.R. (2008) Annual Summary: Atlantic Hurricane Season of 2005 // Monthly Weather Review (American Meteorological Society). V. 136(3). P 1131–1141.
- Blowers A. and Hinchliffe S. (2003) Environmental Responses. Wiley, London, 312 pp.
- Bohle H. (2001) Vulnerability and criticality: perspectives from social geography // IHDP Update, 2, pp. 231-239.
- Bras R.L. (1990) Hydrology. New York: Addison-Wesley. 643 pp.
- Delgado J.P. (1998) Encyclopedia of underwater and maritime archaeology. New Haven, London, 135 pp.
- Enz R. (2006). Natural catastrophes and man-made disasters 2005 // Sigma. No. 2. P. 1-40.
- Enz R., Karl K., Mehlhorn J., and Schwarz S. (2008) Natural catastrophes and man-made disasters: High losses in Europe // Sigma. No. 1. P. 1-48.
- Field C.B. and Raupach M.R. (eds) (2004) Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World. Washington: Island Press. 584 p.
- Field J.G., Hempel G., and Summerhayes C.P. (eds) (2002) Oceans 2020: Science Trends and the Challenge of Sustainability. Washington: Island Press. 296 p.
- Flood J. (1995) Indicators for the implementation and monitoring of Agenda // Habitat, vol.1, No. 5, p.13.
- Gardner J.S. (2002) Natural hazards risk in the Kullu District, Himachal Pradesh, India // The Geographical Review, vol. 92, pp. 172-177.
- Gutberlet J. (2003) Cities, consumption and the generation of waste // Aviso, No. 11, pp. 12-19.
- Hardy J.T. (2003) Climate Change. Washington: Wiley. 260 p.
- Krapivin V.F. and Phillips G.W. (2001) A remote sensing-based expert system to study the Aral-Caspian aquageosystem water regime // Remote Sensing of Environment, vol.75, pp. 201-215.
- Krapivin V.F. and Varotsos C.A. (2007) Globalization and sustainable development. Chichester, U.K. : Springer/Praxis. 562 p.
- Krapivin V.F. and Varotsos C.A. (2008) Biogeochemical cycles in globalization and sustainable development. Chichester, U.K. : Springer/Praxis. 304 p.

- Lanchester F.W.* (1917) Aircraft in warfare, the dawn of the Fourth Arm. London: Constable and company limited. P. 30-41.
- McNulty S.G.* (2002) Hurricane impacts on US forest carbon sequestration // Environmental Pollution, vol. 116, pp. S17-S24.
- Milne A.* (2004) Doomsday: The Science of Catastrophic Events. Westport: Praeger Publisher. 194 p.
- Morris J.* (1997) Introduction: Climate change – prevention or adaptation? //IEA Stud. Educ., No. 10, pp.13-37.
- Notron R.* (2002). Early Eighteenth-Century Newspaper Reports: A Sourcebook "Natural Catastrophes", <http://www.infopt.demon.co.uk/grub/catastro.htm>
- Posner R.A.* (2004) Catastrophe: Risk and Response. Oxford Univ. Press, Oxford, 332 pp.
- Richter C.F.* (1969) Earthquakes //Natural History. V. 78. P. 37-45.
- Schneider D.* (1995) Global warming is still a hot topic // Scientific American. V. 272(2). P.13-14.
- Vogel C. and O'Brien K.* (2004) Vulnerability and global environmental change: rhetoric and reality //Aviso (An International Bulletin on Global Environmental Change and Human Security), no. 13, pp. 1-8.
- Walker G.* (2003) Snowball Earth: The Story of the Great Global Catastrophe that Spawned Life as We Know It. Crown Publishers, New York, 269 pp.
- WI* (2009) State of the World 2009: Into a warming World. Washington: Worldwatch Institute. 262 p.
- Zanetti A., Schwarz S., and Lindemuth S.* (2007) Natural catastrophes and man-made disasters in 2006: Low insured losses // *Sigma*. No. 2. P. 1-40.
- Zimmerli P.* (2003) Natural catastrophes and reinsurance. Zurich (Switzerland): Swiss Reinsurance Company. 48 p.