

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**Химический факультет
Кафедра радиохимии**

Болдырев Олег Борисович

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ
РАДИАЦИОННОГО ФОНА В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ
АЗОВСКОГО МОРЯ**

Дипломная работа

Руководитель
д.х.н., проф. Бекман И.Н.

Москва 2004 г

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	5
1. ЕСТЕСТВЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ФОН	5
1.1 Земная радиация	5
1.2 Космическое излучение	6
1.3 Природные радионуклиды	7
1.3.1 Радионуклиды земной коры	7
1.3.2 Природные радионуклиды атмосферы	8
1.3.3 Радионуклиды в природных водах	10
1.4 Флуктуации естественного радиационного фона	12
2. ТЕХНОГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ	13
2.1 Продукты испытаний ядерного оружия	13
2.2 Выбросы предприятий ядерного топливного цикла (в том числе – АЭС)	14
2.2.1 Выбросы радиоактивных газообразных отходов АЭС в атмосферу.	15
2.2.2 Источники газообразных отходов.	15
2.2.3 Краткая характеристика газообразных отходов.	16
2.2.4 Нормирование выбросов радиоактивных газов в атмосферу.	18
2.3 Радиоактивные выбросы тепловых электростанций	19
2.4 Криптон-85 в атмосфере Земли	21
2.5 Выбросы при авариях на предприятиях ядерного топливного цикла.	22
3. ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ПРИМОРСКИХ РЕГИОНАХ	24
4. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА НА СЕВЕРНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ АЗОВСКОГО МОРЯ	24
4.1 Экология г. Мариуполя и прилегающих регионов (курортной зоны)	25
4.2 Радиоэкология побережья Азовского моря	25
4.2.1 Черные пески на пляжах Азовского моря	26
4.2.2 Радиоактивность черных песков	27
4.2.3 Химический и минералогический состав черных песков	27
4.2.4 Экологическая опасность черных песков.	28
4.3 Климатические особенности региона	29
4.4 Экологический риск жителей региона.	29
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	30
1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ	30
2. АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ РАДИАЦИОННОГО ПОЛЯ В 1988-2003 ГОДАХ	30
2.1 Статистические методы обработки временных рядов	30
2.2 Стандартные методы обработки совокупности чисел.	31
2.3 Первичная обработка флуктуаций γ -фона	35
2.4 Анализ флуктуаций фона как временного ряда.	40
3. АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ РАДИАЦИОННОГО ПОЛЯ ПО ГОДАМ (В ПЕРИОД 1988-2003 ГГ.)	48
4. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.	52
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ	57
ВЫВОДЫ	63
ЛИТЕРАТУРА	64
ПРИЛОЖЕНИЯ	66

ВВЕДЕНИЕ

Оценка радиационной опасности плотно заселенной территории является одним из важнейших компонентов концепции анализа и управления экологическим риском. Известно, что дозовая нагрузка на население конкретного региона определяется распределением источников ионизирующего излучения в среде обитания, а также характером флуктуации радиационного поля во времени и пространстве. Учет вредного влияния радионуклидов и испускаемых ими ионизирующих излучений на животный мир и человека ценен сам по себе, но особенно важным он становится при возникновении эффектов синергизма – одновременного и сильного отрицательного влияния на экологическую обстановку вредных факторов (тяжелых металлов, диоксинов, угарного газа, радиоактивных излучений, бактерий, микрофлоры, шума и т.п.). В этом смысле особый интерес представляет северное побережье Азовского моря, для которого характерна большая плотность населения, интенсивная металлургическая промышленность и развитая курортная база, преимущественно – детская. Этот регион находится в зоне воздействия техногенных (радиоактивные выбросы Хмельницкой и Ростовской АЭС, стоки реки Дон – инфильтранты Воронежской АЭС) и природных (калиевые морские аэрозоли, изотопы радона (радон-222 и радон-220 (торон)), выделяющиеся из урановых и ториевых минералов, радон-222, выделяющийся из морских скважин, пробуренных в акватории Азовского моря в поисках природного газа) радионуклидов. Поэтому существует настоятельная необходимость создания долгосрочных прогнозов влияния радиацио-экологической обстановки на здоровье жителей и отдыхающих на побережье Азовского моря.

С 1982 года кафедра радиохимии химического факультета МГУ проводит регулярные научно-исследовательские экспедиции на морских судах в акваториях Средиземного, Черного и Азовского морей. В задачи экспедиций входит: обнаружение скоплений радиоактивных песков на пляжах Азовского моря; изучение разности радиоактивных веществ в окружающей среде; определение минералогического, химического и радиоизотопного состава монацитовых песков; оценка способности объектов среды обитания к самоочищению.

Радиометрическое картирование территории позволило обнаружить ряд радиационных аномалий – участков местности, испускающих интенсивное ионизирующее излучение. Один из таких участков находится на побережье северной части Азовского моря (регион г.г. Таганрог – Мариуполь – Бердянск). Оказалось, что повышенный радиационный фон связан с так называемыми «черными песками», содержащими монацит – фосфат тория. Долгоживущий ^{232}Th последовательно распадается на ряд элементов. Практически все продукты распада ториевого ряда – металлы, они прочно удерживаются в кристаллической решетке и не покидают минералы. Но один из продуктов – радон – тяжелый радиоактивный инертный газ. Он способен покидать песок и выделяться в окружающее пространство. Изотопы радона (^{222}Rn и ^{220}Rn) представляют реальную опасность для населения и отдыхающих на курортах Мариуполя-Бердянска поскольку известно, что попадание радона внутрь организма приводит к серьезным последствиям, в частности, - к такому тяжелому заболеванию, как рак легких.

В настоящее время детские курорты северной части Азовского моря приобретают Европейское значение. Поэтому анализ экологического риска и создание на его основе долгосрочного прогноза влияния радиационной обстановки на здоровье жителей и отдыхающих несомненно представляет **актуальную задачу**.

Техногенные и природные радионуклиды, космическое излучение и вторичная радиация, возникающая при взаимодействии космического излучения с солями, растворенными в морской воде приводят к возникновению радиационного поля, оказывающего вредное влияние на биоту прибрежных экосистем, в том числе – на человека. Интенсивность радиационного поля не является постоянной - она непрерывно изменяется во времени. При этом возможны суточные колебания, сезонные, годовые и

более сложные временные циклы. На гармонические колебания накладываются отдельные выбросы, носящие случайный характер. Они зависят от событий в космическом пространстве (например, от рождения новых звезд, аннигиляции черных дыр и т.п.), от климатических параметров (например, от силы или направления ветров, способных поднимать в воздух природные радионуклиды), от деятельности человека (например, несанкционированные сбросы техногенных радионуклидов на АЭС). Поэтому флуктуации радиационного поля – сложный процесс, количественное описание которого требует привлечения современных статистических методов и быстродействующих ЭВМ.

Поскольку интенсивность радиационного поля – функция времени, то и радиационная доза, получаемая населением – функция времени. Это означает, что в некоторые сезоны возможно аномально высокое облучение. При этом следует учесть, что климатические параметры (температура, атмосферное давление, влажность и т.п.) также изменяются во времени и также в какие-то сезоны могут создать неблагоприятную с точки зрения здоровья человека обстановку. Особенно опасно, если неблагоприятные сезоны совпадают, так что возникают катастрофические «резонансы». Именно поиск эффектов синергизма и составляет основную проблему анализа экологического риска.

Цель работы: анализ временного дрейфа радиационного поля и флуктуаций климатических параметров (температура воздуха, атмосферное давление, абсолютная и относительная влажности, направление и скорость ветра.)

Задачи исследования:

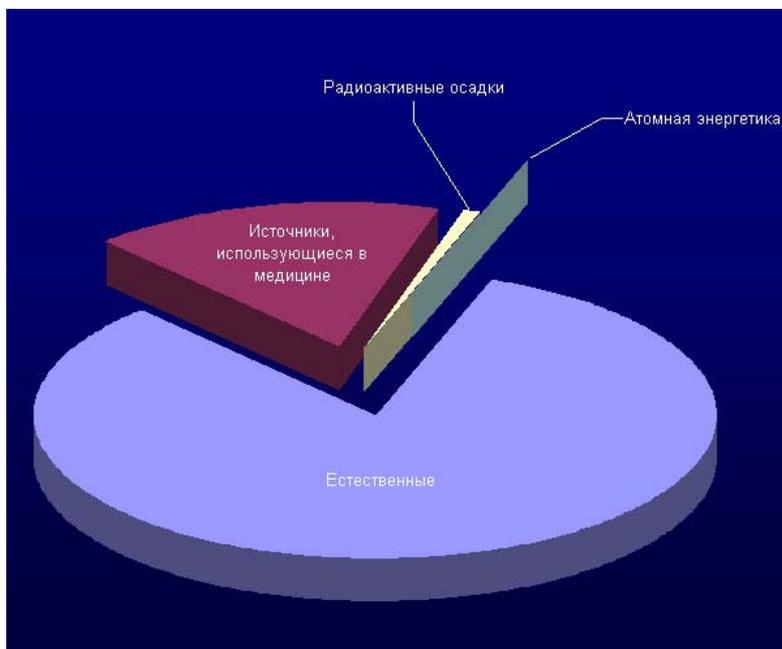
1. Статистическая обработка результатов измерений гамма-фона в г. Мариуполе, проведенных в 1988 – 2003 годах.
2. Статистическая обработка данных измерения климатических параметров (атмосферное давление, температура атмосферного воздуха, атмосферное давление, абсолютная и относительная влажность воздуха, направление и скорость ветра), и интенсивности радиационного поля, измеренных в Северной части Азовского моря в 1996 году.
3. Выявление связи интенсивности радиационного поля с метеорологическими параметрами.
4. Поиск адекватной модели флуктуации радиационного фона и её применение для прогноза радиационной обстановки в регионе.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1. Естественный радиационный фон

1.1 Земная радиация

Избежать облучения ионизирующим излучением невозможно. Жизнь на Земле возникла и продолжает развиваться в условиях постоянного облучения. Радиационный фон Земли складывается из трех компонент [1,2]:



- космическое излучение;
- излучение от рассеянных в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды природных радионуклидов;
- излучение от искусственных (техногенных) радионуклидов.

Рис.1 Вклад различных источников излучения в дозовую нагрузку населения

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации (Рис.1). На протяжении всей истории существования Земли разные виды излучения падают на

поверхность Земли из космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре.

Облучению от естественных источников радиации подвергается любой житель Земли, однако одни из них получают большие дозы, чем другие. Уровень радиации в некоторых местах земного шара, там, где залегают особенно радиоактивные породы, оказывается значительно выше среднего, а в других местах - соответственно ниже. Доза облучения зависит также от образа жизни людей. Применение некоторых строительных материалов, использование газа для приготовления пищи, открытых угольных жаровень, герметизация помещений и даже полеты на самолетах - все увеличивает уровень облучения за счет естественных источников радиации.

Земные источники радиации в сумме ответственны за большую часть облучения, которому подвергается человек за счет естественной радиации. В среднем они обеспечивают более 5/6 годовой эффективной эквивалентной дозы [2].

Радиоактивность в природе обусловлена распространением естественных радиоактивных элементов и изотопов в различных природных образованиях: минералах и горных породах, атмосфере, гидросфере, биосфере, а также в космических телах. Наличие радиоактивных свойств установлено у 60 природных изотопов. К ним относятся ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th , которые, распадаясь, образуют три ряда генетически связанных радионуклидов, а также калий-40 и рубидий-87.

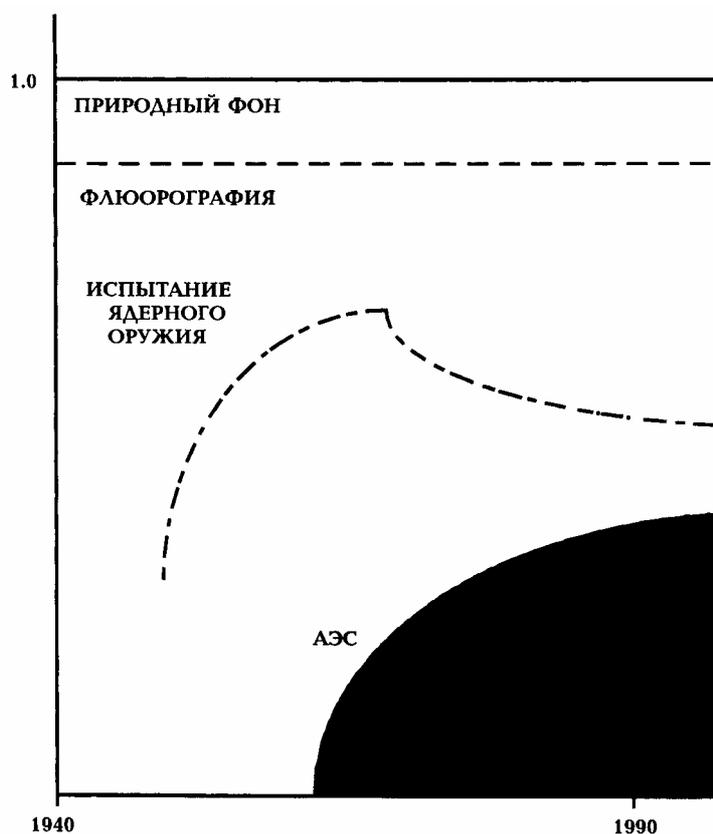


Рис.2 Вклад природных факторов и деятельности человека в дозовую нагрузку на население

Вклады от разных источников в облучение варьируется в пространстве и времени.

Динамика изменения вкладов различных источников радиации в общее облучение населения за последние 60 лет схематически изображена на Рис.2. Видно, что ни последствия испытаний ядерного оружия, ни развитие атомной энергетики не оказали существенного влияния на дозовую нагрузку, причем вклад этих источников в облучение постоянно снижается. Вклад от природного фона постоянен. Постоянна и доза от флюорографии и рентгеновской диагностики человека. Вклад радона в дозовую нагрузку в среднем на треть меньше

флюорографии, но в некоторых регионах дозы от флюорографии и от радона сравнимы по величине.

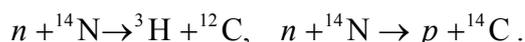
Ведущим фактором облучения населения России являются природные (65,5%) и медицинские (29,5%) источники ионизирующего облучения. Вклад техногенных источников в коллективную дозу облучения населения составляет около 1%, в том числе за счёт глобальных выпадений вследствие испытания ядерного оружия - 0,9%, за счёт промышленных НИИ - 0,1%. Уровень облучения населения от техногенных источников низок даже вблизи крупнейших предприятий ядерного топливного цикла.

1.2 Космическое излучение

Космическое излучение складывается из частиц, захваченных магнитным полем Земли, галактического космического излучения и корпускулярного излучения Солнца. В его состав входят в основном электроны, протоны и α -частицы. Это так называемое первичное космическое излучение, взаимодействуя с атмосферой Земли, порождает вторичное излучение. В результате на уровне моря излучение состоит почти полностью из мюонов (подавляющая часть) и нейтронов [2].

Поглощенная мощность дозы космического излучения в воздухе на уровне моря равна 32 нГр/час и формируется в основном мюонами. Для нейтронов на уровне моря мощность поглощенной дозы составляет 0.8 нГр/час и мощность эквивалентной дозы составляет 2.4 нЗв/час. За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около 0.35 мЗв в год. Космическому внешнему облучению подвергается вся поверхность Земли. Однако облучение это неравномерно. Интенсивность космического излучения зависит от солнечной активности, географического положения объекта и возрастает с высотой над уровнем моря. Наиболее интенсивно оно на Северном и Южном полюсах, менее интенсивно в экваториальных областях. Причина этого - магнитное поле Земли, отклоняющее заряженные частицы космического излучения.

В результате ядерных реакций, идущих в атмосфере (а частично и в литосфере) под влиянием космических лучей, образуются радиоактивные ядра - космогенные радионуклиды. Например:



В создание дозы наибольший вклад вносят ${}^3\text{H}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{14}\text{C}$ и ${}^{22}\text{Na}$ которые поступают вместе с пищей в организм человека (Табл.1).

Таблица 1. Среднее годовое поступление космогенных радионуклидов в организм человека.

Радионуклид	Поступление, Бк/год	Годовая эффективная доза, мкЗв
${}^3\text{H}$	250	0.004
${}^7\text{Be}$	50	0.002
${}^{14}\text{C}$	20000	12
${}^{22}\text{Na}$	50	0.15

Суммарный вклад космогенных радионуклидов в индивидуальную дозу составляет 0,015 мЗв/год.

1.3 Природные радионуклиды

1.3.1 Радионуклиды земной коры

В настоящее время на Земле сохранилось 23 долгоживущих радиоактивных элемента с периодами полураспада от 10^7 лет и выше. Физические характеристики некоторых из них представлены в Табл.2 [1].

Таблица 2. Радиоактивные изотопы, изначально присутствующие на Земле.

Радионуклид	Весовое содержание в земной коре	Период полураспада, лет:	Тип распада:
Уран-238	$3 \cdot 10^{-6}$	$4.5 \cdot 10^9$	α -распад
Торий-232	$8 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	α -распад, γ -распад
Калий-40	$3 \cdot 10^{-16}$	$1.3 \cdot 10^9$	(β - распад, γ -распад)
Ванадий-50	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{14}$	γ -распад
Рубидий-87	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{10}$	β -распад
Индий-115	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{14}$	β -распад
Лантан-138	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{11}$	β -распад, γ -распад
Самарий-147	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{11}$	α -распад
Лютеций-176	$3 \cdot 10^{-8}$	$2.1 \cdot 10^{10}$	β -распад, γ -распад

Естественная радиоактивность литосферы обусловлена присутствием в слагающих ее геологических образованиях радиоактивных изотопов U, Th, K и Rb, среднее содержание которых, в земной коре составляет соответственно 2,5 и 13 г/т и 2,5%. Перечисленные естественные радионуклиды генерируют радиоактивное излучение, мощность экспозиционной дозы которого для всего земного шара колеблется в пределах 3-10 мкР/ч при среднем значении 6 мкР/ч.

Уран и торий широко распространены в окружающей среде и является основным источником радиоактивности грунта. Типичные концентрации в исходных продуктах строительных материалов составляют: 1 - 10 ppm совместно урана и тория в песке, сланцах или известняке и 3 - 12 ppm для урана и 10 - 80 ppm для тория в граните. Соответствующие активности варьируются от 0,02 до 0,60 Бк/г.

В земных объектах уран и торий могут входить в заметных количествах в кристаллические решетки ряда минералов в виде изоморфной примеси и даже образовывать самостоятельные урановые и ториевые минералы, в которых эти элементы являются главными компонентами. Важнейшими урановыми минералами являются безводные его окислы. При преобладании в составе минерала окислов 4-валентного урана

он называется уранитом, при преобладании 6-валентного урана - урановой смолкой. Эти минералы имеют черный цвет и характерный смоляной блеск в свежем изломе. К важнейшим ториевым минералам относятся торинит (безводный окисел тория), торит (силикат тория) и монацит (безводный фосфат церия, в котором содержание тория достигает иногда 28%. Монацит - очень устойчивый минерал и при разрушении породы переходит в россыпи. Монацитовые пески являются важным источником для извлечения тория и редких земель. Уран значительно более подвижен, чем торий, и при разрушении минералов мигрирует в растворенном состоянии, образуя затем серию вторичных минералов, объединяемых под общим названием "урановые слюдки". Эти минералы легко растворимы и характеризуются отсутствием у них радиоактивного равновесия. Радий - элемент весьма подвижный, что объясняется положением его в кристаллической решетке урановых минералов: образуясь из урана путем трех актов α -распада, Ra находится не в узлах кристаллической решетки, а в междоузловых промежутках кристалла, он легко попадает в поры, трещины и другие нарушения кристалла и выщелачивается водой или растворами. В результате, равновесие радий уран может быть существенно сдвинуто. В морской воде содержание Ra не превышает $1 \cdot 10^{-10}$ мг/м³, в некоторых же минеральных источниках его содержание может доходить до 10^{-8} - 10^{-9} г/л. В некоторых условиях радий накапливается и может образовывать радиевые минералы, вообще не содержащие урана (например, радиокальцит). Высокая миграционная способность радия и радона создает вокруг урановых месторождений ореолы повышенной активности почвенного воздуха, иногда превышающие кларковые содержания этих элементов в сотни и тысячи раз [1].

Содержание естественных радионуклидов в разных типах почв различно (Табл.3).

Таблица 3. Содержание радиоактивных элементов в почвах (%)

Почвы	Радий, * 10^{-10}	Уран, рассчитанный по равновесию с радием, * 10^{-4}	Истинное содержание урана, * 10^{-4}	Торий* 10^{-4}	Торий Уран
Подзолистые	0,89	2,66	0,12	4,8	40
Серые лесные	0,28	0,84	0,12	6,0	50
Краснозем	0,30	0,90	0,35	2,6	7,1
Чернозем	0,91	2,72	0,93	5,2	5,7

Из Табл.3 следует, что отношения тория к урану во всех почвах, особенно в подзолистых и серых лесных, значительно выше, чем в горных породах, за счет которых образовались эти почвы. Известно, что в горных породах это отношение обычно близко к трем.

1.3.2 Природные радионуклиды атмосферы

Радиоактивность атмосферы Земли связана в основном с изотопами радона и продуктами их распада.

В окружающую среду радон поступает из различных источников. Большая часть поступает из скальных пород в земной коре и переносится к поверхности потоками грунтовых вод. Основные источники выбросов радона в окружающую среду приведены в Табл.4 [3].

Таблица 4. Установленные выбросы ^{222}Rn в США в 1978 г. от различных естественных и техногенных источников.

Источник	Ежегодные выбросы, Бк/г
Интерьер помещений, зданий	$5,55 \cdot 10^{14}$
Естественные почвы	$4,44 \cdot 10^{18}$
Естественные испарения	$3,26 \cdot 10^{17}$
Природный газ:	
Домашние кухонные плиты	$7,4 \cdot 10^{12}$
Домашние обогреватели	$2,96 \cdot 10^{11}$
Промышленное использование	$4,07 \cdot 10^{14}$
Урановая промышленность:	

Обогащение (действующее производство)	$7,4 \cdot 10^{15}$
Обогащение (закрытое производство)	$5,55 \cdot 10^{15}$
Неурановые рудники:	
Фосфатные	$1,96 \cdot 10^{15}$
Угольные	$5,18 \cdot 10^{14}$
Фосфатные удобрения	$1,78 \cdot 10^{15}$
Жидкое нефтяное топливо:	
Домашние кухонные плиты	$6,66 \cdot 10^{10}$
Домашние обогреватели	$4,81 \cdot 10^{10}$
Геотермальная энергия	$2,15 \cdot 10^{13}$
Угольные ТЭЦ	$1,85 \cdot 10^{13}$
Нефтяные и газовые скважины	$8,51 \cdot 10^{12}$

Среднее содержание ^{238}U на материках около 3 мкг/т. При этом результирующая активность горных пород составляет 50000 Бк/т*с, т.е. каждую секунду тонна горной породы генерирует 50000 атомов радона. Однако радон в недрах земли распространен крайне неравномерно. Это связано с тем, что радон накапливается в тектонических нарушениях, куда он поступает по системам микротрещин из горных пород. Радон выделение определяется как общей радиоактивностью горных пород, так и их коллекторскими свойствами (способностью аккумулировать радон) и коэффициентом эманирования (способностью выделять накопленный радон). В практике геологических исследований нередки случаи, когда слаборадиоактивные породы содержат в своих пустотах и трещинах радон в количествах, в сотни и тысячи раз больших, чем более радиоактивные горные породы. При своеобразном дыхании Земли радон выделяется из горных пород в атмосферу, причем в наибольших количествах из участков Земли, в пределах которых имеются коллекторы радона [4].

Наиболее важный естественный источник ^{222}Rn – распад ^{226}Ra в почве и скальных породах в земной коре. Среднее содержание ^{226}Ra в почве равно $2 \cdot 10^{-12}$ г радия на 1 г почвы. Гамма-излучение над горными породами и почвами за счет естественных изотопов радия, тория (и их продуктов распада) и калия колеблется обычно от 7 до 20 мкР/час, составляя в среднем 8-10 мкР/час (без учета гамма-излучения за счет космического излучения, равного 3,7-4,6 мкР/час). В некоторых районах массового проживания человека фон естественной радиации значительно превосходит средний уровень по земному шару. Так в монацитовых районах Индии мощность дозы достигает 320 мкРад/час (2,8 рад/год), Бразилии – 115 мкРад/час, районах вулканической экстрезии 1370 мкРад/час (12 рад/год), гранитных районах Франции – 40 мкРад/час. Содержание радия в морской воде колеблется в пределах $(0,007-0,3) \cdot 10^{-12}$ кюри/л, в реке Миссисипи – $(1-3) \cdot 10^{-12}$, в питьевой воде: Россия $1 \cdot 10^{-12}$, Австрия – $6 \cdot 10^{-12}$, колодцы США – до $3,5 \cdot 10^{-12}$, источники: США $3 \cdot 10^{-7}$, Япония $7 \cdot 10^{-7}$, Чехия (Яхимов) $5 \cdot 10^{-7}$, воды урановых месторождений $(8-2000) \cdot 10^{-12}$ кюри/л. Источники минеральных вод СНГ: Пятигорск $3 \cdot 10^{-12}$, Баку $9 \cdot 10^{-12}$, Ухта $7,5 \cdot 10^{-9}$, Закавказье (№18) $3,7 \cdot 10^{-10}$, Магеста $5 \cdot 10^{-11}$ кюри/л. Радиоактивность травы равна $1 \cdot 10^{-8}$ – $0,5 \cdot 10^{-9}$ кюри/кг, мхов – $0,5 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-7}$. Содержание радия-226 в растениях и пищевых продуктах изменяется от $0,1 \cdot 10^{-12}$ до $6,1 \cdot 10^{-12}$ кюри/г. Содержание радия в зерне $2,3 \cdot 10^{-15}$ кюри/г продукта, в картофеле $9,6 \cdot 10^{-15}$, в сухом молоке $1,7 \cdot 10^{-15}$, в треске $4,0 \cdot 10^{-15}$, моркови и капусте $1,7 \cdot 10^{-15}$ кюри/г. Содержание радия-226 в теле человека колеблется в пределах (3-1400) пкюри/г (в среднем 75), радия-228 (мезоторий) 50 пкюри [5].

В результате радиоактивного распада изотопов радия атомы радона попадают в кристаллическую решетку минералов. Процесс выделения радона из минералов и пород в паровое или трещинное пространство получил название эманирования. Не все атомы радона могут выделиться в поровое пространство, поэтому для характеристики степени высвобождения радона используется коэффициент эманирования. Его величина зависит от характера породы, ее структуры и степени ее раздробленности. Различают два механизма эманирования: за счет отдачи и за счет диффузии. Чем меньше зерна породы,

чем больше внешняя поверхность зерен, тем активнее идет процесс эманирования. Поток радона из грунта в атмосферу зависит от пористости почвы (общая пористость, размер пор, доля открытой пористости), от влажности атмосферы (влагонасыщенности пор), от состояния внутренней поверхности пор (например, от наличия водных слоев на поверхности пор [3-8]).

Судьба радона связана с характером заполнения порового пространства породы. В зоне аэрации, то есть выше уровня грунтовых вод, поры и трещины пород и почв заполнены, как правило, воздухом. Ниже уровня грунтовых вод все пустотное пространство пород заполнено водой. В первом случае радон как всякий газ распространяется по законам диффузии. Во втором - может также мигрировать вместе с водой. Дальность миграции радона определяется его периодом полураспада. Поскольку этот период не очень велик, дальность миграции радона не может быть большой. Для сухой породы она больше, однако, как правило, радон мигрирует в водной среде.

Во всех местах залегания урановых и ториевых минералов, радон и торон поступают в атмосферу путем диффузии и/или отдачи. Поскольку выделение радона из почвы сильно зависит от типа почвы в данной местности и от атмосферных условий, поток радона из почвы и соответствующие его концентрации в атмосфере сильно изменяются в зависимости от местности и времени суток. Выбросы радона от этого источника равны $4,44 \cdot 10^{18}$ Бк/год. Малые количества (менее 0,2%) приходятся на долю деятельности по добыче урана и на долю отвалов переработанных руд, т.е. на деятельность, связанную с производством ядерной энергии. Средние концентрации радона и торона в воздухе составляют $(1-3) \cdot 10^{-13}$ и $0,5 \cdot 10^{-13}$ кюри/л. В районах повышенной естественной радиоактивности эти значения могут быть выше в несколько десятков раз. Выход радона и торона из почвы в атмосферу (эксхалация) колеблется от времени года. Так, эксхалация радона под Петербургом составляет весной, летом, осенью и зимой 2,6; 6,6; 7,7 и $5,2 \cdot 10^{-10}$ кюри/м³*ч соответственно.

Помимо содержания естественных радиоактивных элементов урана и тория в почве большое влияние на величину удельной концентрации радона и торона в атмосферном воздухе оказывают условия перемещения воздушных масс. Наибольшая концентрация изотопов радона наблюдается в приземном слое атмосферы, с увеличением высоты она уменьшается. Если концентрацию этих газов на уровне почвы принять за 100%, то на высоте 100 м концентрация радона 69%, а торона 25%. До 90% активности естественных радиоактивных изотопов, содержащихся в воздухе, сорбировано на частицах диаметром не более 5 микрон; при этом основная часть активности приходится на аэрозоли диаметром от 0,001 до 0,4 мк.

Значительное количество радона поступает в атмосферу в ходе землетрясений и извержений вулканов [9].

Утечка радона в окружающую среду может происходить из-за отвалов на действующих предприятиях по обогащению урана. В некоторых местах остатки ²²⁶Ra в отвалах находятся в концентрациях, в тысячи раз превышающих концентрации в земной коре. Установлено, что в США выбросы ²²²Rn из отвалов составляют примерно $5,4 \cdot 10^{15}$ Бк/г. Количество таких отходов составило 10^9 т и продолжает увеличиваться по параболическому закону.

1.3.3 Радионуклиды в природных водах

Все естественные источники пресной воды содержат в растворенном виде природные радионуклиды. Из них, при потреблении внутрь, наиболее опасны α -излучающие изотопы. Ниже приведены основные α -излучатели и соответствующие эффективные дозы, которые может получить человек за год употребления воды, содержащей любой из этих α -радионуклидов с уровнем радиоактивности 0,1 Бк/л [1].

Таблица 5. Растворенные в воде радионуклиды - α -излучатели.

Радионуклид	Обозначение	Годовая доза при уровне радиоактивности 0.1 Бк/л, мЗв
Полоний-210	^{210}Po	0,045
Радий-224	^{224}Ra	0,006
Радий-226	^{226}Ra	0,016
Торий-232	^{232}Th	0,130
Уран-234	^{234}U	0,003
Уран-238	^{238}U	0,003
Плутоний-239	^{239}Pu	0,04

Из Табл.5 видно, что только в случае ^{232}Th , при его содержании в воде на уровне α -активности в 0,1 Бк/л будет превышена считающейся безопасной доза в 0,1 мЗв за год. (Вода считается радиологически безопасной при содержании общей α -активности ниже 0,1 Бк/л).

Радиоактивные воды в зависимости от преобладания того или иного радиоэлемента подразделяются на радиевые, радоновые, радоно-радиевые, урано-радиевые, мезоториево-радиевые и т. д. Радоновые воды широко применяются в бальнеологии. Подземные воды, основным лечебным фактором которых является радон, пользуются большой популярностью во всем мире. Всемирно известные курорты Белокуриха, Цхалтубо, Яхимов, Бромбах, Баден-Баден знамениты именно радоновыми водами. К радоновым минеральным водам относятся воды, содержание радона в которых превышает 185 Бк/л. Радоновые воды используются в виде водных и грязевых ванн, или воздушных ингаляций. Они применяются при лечении нервной, сердечно-сосудистой систем, органов дыхания и пищеварения, опорно-двигательного аппарата, болезней обмена веществ. Концентрация радона в минеральных водах колеблется в весьма значительных пределах. Так, в месторождении Барбанштейн (Австрия) концентрация радона достигает 2200, Баден-Баден (Германия) -780, Яхимов (Чехия) - 6290 Бк/л. В российских месторождениях характерны следующие концентрации: Железноводское - 314, Кисловодское- 248, Белокуриха - 926, Дарасун – 847 Бк/л.

Самые высокие уровни радона в воде встречаются в водах, омывающих кристаллические породы высокой трещиноватости с высоким содержанием радия, а также омывающих пески в которых произошло переотложение радия вымытого ранее из кристаллических пород. Подземная вода собирает радон с огромных массивов геологических пород. Эти факты определяют то, что количество радона в воде выше количества радия в десятки и сотни раз.

Подземные воды трещинных массивов кислых кристаллических пород обычно отличаются наиболее высокой концентрацией радона, достигающей 500 Бк/л и выше. Значительно ниже концентрация радона в водах основных изверженных пород. Трещинные воды известняков, песчаников, сланцев обычно имеют концентрацию радона в пределах 10-100 Бк/л. Однако, в отдельных случаях, и в этих породах могут встречаться повышенные концентрации радона. Подземные воды в горизонтах грунтовых вод, залегающих недалеко от поверхности, обычно имеют более низкую концентрацию радона, составляющую менее 50 Бк/л. В поверхностных водах концентрация радона не превышает 2-5 Бк/л, т.к. радон успевает распасться в течение существования воды в поверхностных условиях или уйти в атмосферу за счет аэрации.

Радон попадает из вод в атмосферу за счет процессов эксхалляции-дегазации с выносом радона из воздушных пузырьков, содержащихся в воде, в атмосферу. Наиболее интенсивно этот процесс происходит при разбрызгивании, испарении и кипении воды.

1.4 Флуктуации естественного радиационного фона

Интенсивность радиационного поля на поверхности Земли не является постоянной: она изменяется, как в пространстве, так и во времени.

Уровни земной радиации зависят от концентрации радионуклидов в том или ином участке земной коры. В местах проживания основной массы населения они примерно одного порядка. Так, согласно исследованиям, проведенным во Франции, ФРГ, Италии, Японии и США, примерно 95 % населения этих стран живет в местах, где мощность дозы облучения от земных источников радиации составляет в среднем от 0,3 до 0,6 мЗв в год. Но некоторые группы населения получают значительно большие дозы облучения: около 3 % получает в среднем 1 мЗв в год, а около 1,5 % более 1,4 мЗв в год.

Но есть места, где уровни земной радиации намного выше. Неподдалеку от города Посус-ди-Калдас в Бразилии на небольшой возвышенности уровень радиации в 800 раз превосходит средний (250 мЗв/год). Чуть меньшие уровни радиации зарегистрированы на морском курорте, расположенном в 600 км к востоку от этой возвышенности. Гуарапари – небольшой город с населением 12 тыс. человек – каждое лето становится местом отдыха 30 тыс. курортников. На отдельных участках его пляжей зарегистрирован уровень радиации 175 мЗв в год. Местные населенные пункты стоят на песках, богатых торием. На юго-западе Индии, 70 тыс. человек живут на узкой прибрежной полосе длиной 55 км, вдоль которой также тянутся пески, богатые торием. Данная группа лиц получает в среднем 3,8 мЗв в год на человека. Из них более 500 человек получают свыше 8,7 мЗв в год, а 60 – более 17 мЗв, что в 50 раз больше средней годовой дозы внешнего облучения от земных источников радиации. В Иране, в районе городка Рамсер, где бьют ключи, богатые радием, уровни радиации составляют до 400 мЗв в год [1].

Изменения во времени интенсивности радиационного поля связаны с двумя группами факторов: земными (миграция радионуклидов под влиянием смена направлений ветров, морских течений и т.п.) и внеземными (изменение интенсивности космического излучения, достигающего поверхности, возникновение вторичных излучений из-за образования радионуклидов в процессе взаимодействия космическими излучениями с элементами почвы, морской воды и т.п.) (Рис.3).

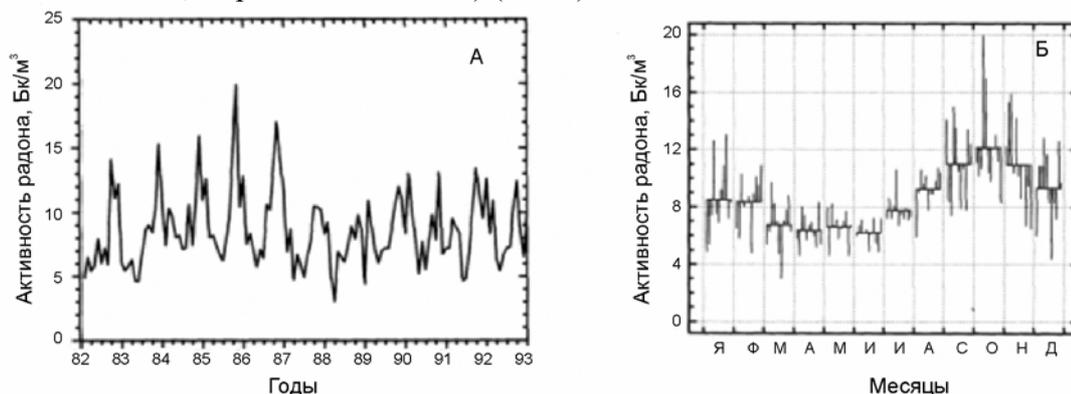


Рис.3 Колебания концентрации радона годовые (А) и месячные (Б).

На характер флуктуаций радиационного поля существенное влияние оказывает изменение во времени метеорологических параметров: температуры, атмосферного давления, относительной и абсолютной влажности воздуха, направления и силы ветра (Рис.4).

В настоящее время полагают, что основной вклад во временные флуктуации интенсивности земного радиационного фона вносит изменение содержания в атмосфере радона и продуктов его распада [10,11].

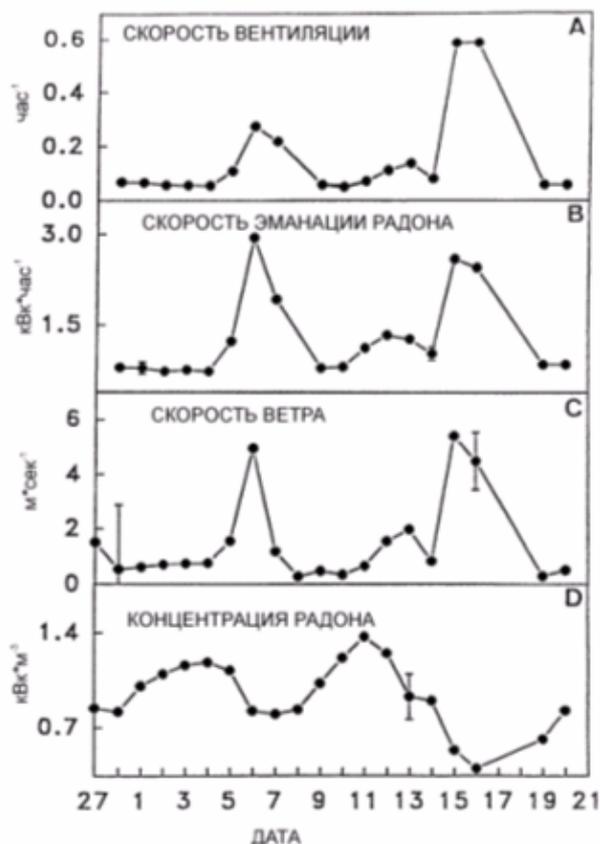


Рис.4 Изменение во времени интенсивности вентиляции помещения (А), скорости выделения радона из почвы (В), скорости ветра (С) и концентрации радона в жилом помещении (D).

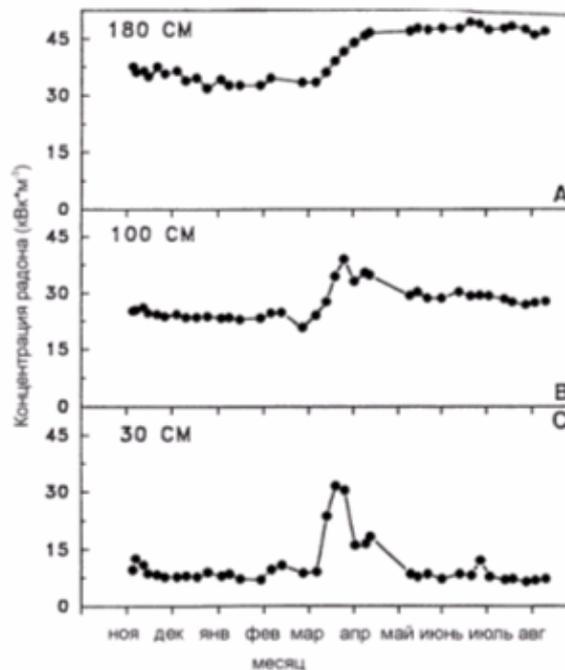


Рис.5 Влияние таяния снегов на концентрацию радона в почве на различной глубине. Период: ноябрь 1989 август 1990.

В неподвижном воздухе тяжелый радон обычно прижат к почве и его концентрация наибольшая на первых этажах. За время миграции из почвы к верхним этажам радон успевает распасться. Концентрация радона в атмосфере существенно зависит от температуры. Поскольку температура в течение суток изменяется периодически, то и концентрация радона также циклически изменяется.

Подобные колебания концентрации радона происходят не только в атмосфере, но и почвах, особенно на малых глубинах. На колебания концентрации радона в атмосфере существенное влияние оказывают температура (среднее значение и амплитуда колебания, разность температур почвы и атмосферы), атмосферное давление, тип (снег, дождь, туман) и интенсивность осадков. Важное значение имеют и такие процессы, как промерзание грунта, таяние снегов (Рис.5) [3].

2. Техногенные радионуклиды в окружающей среде

2.1 Продукты испытаний ядерного оружия

Радиологические последствия испытаний ядерного оружия определяются количеством испытаний, суммарными энерговыделением и активностью осколков деления, видами взрывов (воздушные, наземные, подводные, надводные, подземные) и геофизическими факторами окружающей среды в период испытаний (район, метеобстановка, миграция радионуклидов и др.). Испытания ядерного оружия, которые особенно интенсивно проводились в период 1954-1958 и 1961-1962 гг. стали одной из основных причин повышения радиационного фона Земли и, как следствие этого, глобального повышения доз внешнего и внутреннего облучения населения [12-14].

По оценкам во второй половине 20-го века за счет ядерных испытаний во внешнюю среду поступило $1.81 \cdot 10^{21}$ Бк продуктов ядерного деления (ПЯД), из них на долю

атмосферных испытаний приходится 99.84 %. Распространение радионуклидов приняло планетарные масштабы.

Продукты ядерного деления (ПЯД) представляют собой сложную смесь более чем 200 радиоактивных изотопов 36 элементов (от цинка до гадолиния). Большую часть активности составляют короткоживущие радионуклиды. Так, через 7, через 49 и через 343 суток после взрыва активность ПЯД снижается соответственно в 10, 100 и 1000 раз по сравнению с активностью через час после взрыва. Кроме ПЯД радиоактивное загрязнение обусловлено радионуклидами наведенной активности (^3H , ^{14}C , ^{28}Al , ^{24}Na , ^{56}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co и др.) и неразделившейся частью урана и плутония. Особенно велика роль наведенной активности при термоядерных взрывах [12].

При ядерных взрывах в атмосфере значительная часть осадков (при наземных взрывах до 50%) выпадает вблизи района испытаний. Часть радиоактивных веществ задерживается в нижней части атмосферы и под действием ветра перемещается на большие расстояния, оставаясь примерно на одной и той же широте. Находясь в воздухе примерно месяц, радиоактивные вещества во время этого перемещения постепенно выпадают на Землю. Большая часть радионуклидов выбрасывается в стратосферу (на высоту 10-15 км), где происходит их глобальное рассеивание и в значительной степени распад. Нераспавшиеся радионуклиды выпадают по всей поверхности Земли. Дозы облучения населения от глобальных выпадений незначительны.

Годовые дозы облучения населения коррелируют с частотой испытаний. Так, в 1963 году коллективная среднегодовая доза, связанная с ядерными испытаниями, составила 7% дозы облучения от естественных источников. К 1966 году она снизилась до 2%, а к началу 80-ых годов уменьшилась до 1%. В дальнейшем формирование доз будет происходить практически только за счет ^{14}C .

Суммарная ожидаемая коллективная эффективная доза от всех испытаний, произведенных к настоящему времени, составит в будущем около $3 \cdot 10^7$ чел-Зв (Табл. 6).

Таблица 6. Вклады радионуклидов, образовавшихся при испытаниях ядерного оружия, общую дозу населения.

^{14}C	$T_{1/2} = 5730$ лет	69% общей дозы;
^{137}Cs	$T_{1/2} = 30$ лет	14%;
^{95}Zr	$T_{1/2} = 65$ дней	5.3%;
^{90}Sr	$T_{1/2} = 28$ лет	3.2%;
^{106}Ru	$T_{1/2} = 373$ дня	2.2%;
^{144}Ce	$T_{1/2} = 285$ дней	1.4%;
^3H	$T_{1/2} = 12$ лет	1.2%;
^{131}I	$T_{1/2} = 8$ дней	0.9%;

2.2 Выбросы предприятий ядерного топливного цикла (в том числе – АЭС)

Масштабы строительства, прогнозы развития атомных электростанций (АЭС) и теплоэлектроцентралей (АТЭЦ) и станций теплоснабжения (АСТ) во многих странах свидетельствуют о возрастающей, а для некоторых стран решающей роли ядерной энергетики в электроснабжении и выработке тепла среднего и низкого потенциала для промышленного и коммунально-бытового теплоснабжения [15, 16].

Как показывает практика эксплуатации АЭС, состояние окружающей среды вокруг станции значительно благоприятнее, чем в других областях энергетики. Это достигается тем, что прямой выход радиоактивных отходов ядерных реакторов в окружающую среду предотвращается многоступенчатой системой радиационной защиты. На всех АЭС предусматривают меры по предотвращению радиоактивных выбросов в окружающую среду как в условиях нормальной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях.

Основным потенциальным источником загрязнения биосферы и облучения населения, проживающего вблизи АЭС, являются газоаэрозольные отходы, образуемые в

процессе эксплуатации станции. Выделяют два принципиально различных направления в работах по снижению загрязнения окружающей среды: активный и пассивный [15].

Применительно к атомной энергетике активный способ заключается в предупреждении выбросов радиоактивных продуктов в окружающую среду в результате совершенствования технологических схем и оборудования; в создании замкнутого технологического процесса, исключающего выброс этих продуктов в окружающую среду; в отработке и совершенствовании топливных элементов; в создании высокоэффективных систем очистки. Пассивный способ основан на использовании эффекта рассеивания примесей радиоактивных веществ.

2.2.1 Выбросы радиоактивных газообразных отходов АЭС в атмосферу.

Любая работающая АЭС оказывает мощное влияние на окружающую среду по трем направлениям: газообразные (в том числе радиоактивные) выбросы в атмосферу, выбросы большого количества тепла и неизбежное распространение вокруг АЭС какого-то количества жидких радиоактивных отходов. В процессе работы реактора АЭС суммарная активность делящихся материалов возрастает в миллионы раз. Так, при полной загрузке реактора ВВЭР-440 (30 т урана) суммарная активность топлива, с обогащением 3% по урану-235, составляет $6 \cdot 10^{11}$ Бк (16 Ки). Через год эксплуатации радиоактивность продуктов, образовавшихся в процессе деления ядер, составит $4 \cdot 10^{19}$ Бк (10^9 Ки). При производстве 1 ГВт/год электроэнергии в реакторе АЭС образуется 10^{19} Бк (300 млн Ки) продуктов деления [17].

С точки зрения радиоактивного загрязнения среды работающими в штатном режиме АЭС, первостепенный интерес представляют газоаэрозольные выбросы, как наименее контролируемые после их возникновения. В реакторе любой АЭС из уранового топлива образуются посредством деления атомов около 300 различных радионуклидов, из которых более 30 могут попасть в атмосферу. Среди них: иод-129, углерод-14, цезий-137, тритий, криптон, иод-131, ксенон-133, иод-133, иод-133, аргон-41, криптон-87, ксенон-138, азот-16. При этом наработка $^{85}\text{Kг}$ реактором на несколько порядков выше, чем всех остальных радионуклидов.

Среднесуточный выброс радиоактивных газов и аэрозолей на АЭС в 1992 г. достигал 600-750 Ки/сутки. В среднем в сутки на территории России газообразные выбросы АЭС составили в 1993 г 800 Ки (за год - 300 тысКи).

Большая часть радиоактивности газоаэрозольных выбросов генерируется короткоживущими радионуклидами и без ущерба для окружающей среды распадается за несколько часов или дней.

Кроме обычных газообразных выбросов время от времени АЭС выбрасывает в атмосферу небольшое количество радионуклидов - продуктов коррозии реактора и первого контура, а также осколков деления ядер урана - хром-51, магний-54, кобальт-60, ниобий-95, рутений-106, церий-144 и др. Они прослеживаются на несколько десятков километров вокруг любой АЭС.

2.2.2 Источники газообразных отходов.

В процессе эксплуатации АЭС, происходит наработка продуктов деления в топливе. В реакторах большой мощности ежедневно образуется несколько килограммов продуктов деления (суммарной активностью $(1-300) \cdot 10^{15}$ Бк). При этом основная активность продуктов деления обусловлена короткоживущими осколками ядер.

При работе АЭС образуются три вида радиоактивных отходов: твердые, жидкие или газообразные. Газообразные отходы после очистки и фильтрации рассеивают в атмосфере через вентиляционные трубы с соблюдением нормативов по выбросу радиоактивных веществ. Жидкие отходы очищают, фильтруют, разбавляют или концентрируют и хранят в емкостях в жидком виде или предварительно отверждают. Это повышает безопасность и надежность хранения [17].

Состав радиоактивных отходов и их активность зависят от типа и конструкции реактора, от вида ядерного горючего и теплоносителя и применяемых систем очистки.

2.2.3 Краткая характеристика газообразных отходов.

Таблица 7. Основные радиационные характеристики газообразных нуклидов

Нук-лид	T _{1/2}	E _β ,МэВ	E _γ ,МэВ	Нук-лид	T _{1/2}	E _β ,МэВ	E _γ ,МэВ			
³ H	12,26 года	0,0186	-	¹³³ Xe	5,27 сут	0,346	0,081 (37%)			
¹⁴ C	5730 лет	0,156	-	^{133m} Xe	2,3 сут	-	0,233 (14%)			
⁴¹ Ar	1,83 ч	2,49 (0,8%) 1,198(99,2%)	1,293 (99%)	¹³⁵ Xe	9,14 ч	0,92	0,250 (91%) 0,61 (3%)			
^{83m} Kr	1,86 ч		0,009 (9%)	^{135m} Xe	15,6 мин	-	0,527 (80%)			
⁸⁵ Kr	10,76 года	0,67	0,514 (0,41%)	¹³⁷ Xe	3,9 мин	4,1	0,455 (33%)			
			0,150 (74%)	¹³⁸ Xe	17,5 мин	2,4	Сложный			
			0,305 (13%)	¹³⁹ Xe	43 с	-	“			
^{85m} Kr	4,4 ч	0,82		¹⁴⁰ Xe	16 с	-	0,13			
⁸⁷ Kr	76 мин	3,8	0,403 (84%) 0,85 (16%) 2,57 (35%)	¹³¹ I	8,05 сут	0,806	0,080(2,6%) 0,284(5,4%) 0,364(82%) 0,637(6,8%) 0,723(1,6%)			
⁸⁸ Kr	2,8 ч	2,8	0,166 (7%)				¹³² I	2,26 ч	2,12	Сложный
			0,191 (35%)				¹³³ I	20,3 ч	1,27	0,53 (90%)
			0,36 (5%)				¹³⁴ I	52 мин	2,43	-
			0,85 (23%)				¹³⁵ I	6,68 ч	1,4	Сложный
			1,55 (14%) 2,19 (18%) 2,4 (35%)							
⁸⁹ Kr	3,18 мин	4,0	Сложный							

Радиоактивные инертные газы. При делении топлива образуется более десятка нуклидов Xe и Kr, имеющих различные радиационные характеристики (Табл.7-10). Общий объем их в расчете на 1 МВт.сут равен 25 см³ (при нормальном давлении и комнатной температуре). В теплоноситель они попадают при разгерметизации оболочек твэлов. В реакторах типа ВВЭР РБГ могут поступать во внешнюю среду с утечкой воды из первого контура. Общая их активность равна 0.3 ТБк/МВт.год, причем основной вклад в активность этих отходов вносит ¹³³Xe [17].

В реакторах кипящего типа РБГ во внешнюю атмосферу могут попасть вместе с неконденсирующимися газами, отсасываемыми эжектором из конденсатора турбины. Их активность в десятки и сотни раз больше активности РБГ в выбросах реакторов типа ВВЭР и изменяется в широком диапазоне: от 0.074 до 4.4 ТБк/МВт.год. Около 60% всей активности приходится на короткоживущие нуклиды ⁸⁷Kr, ⁸⁸Kr, ¹³⁵Xe, ^{85m}Kr.

Таблица 8. Поступление радиоактивных газов в атмосферу (1979г.)

Тип реактора	Активность, МБк/[МВт *год]		
	РБГ, ТБк	Иод	Аэрозоли (без иода)
ВВЭР	0,11 – 0,28	0,74 – 9,25	0,37 – 11
РБМК	<2,8	3,7 - 560	0,3

Таблица 9. Среднее количество радиоактивных газоаэрозольных выбросов (ГБк на ГВт произведенной электроэнергии) разных реакторов (средние данные за 1980-1984 гг.)

Реактор	РБГ*	Иод-131	ДЖН**	Тритий
		10-3	10-3	
РБМК	5500	80	16	1.3
ВВЭР	220	1.7	4.5	5.9
CSR	2320	1.4	1.4	54
BWR	2200	9.3	43	3.4
HWR	210	0.23	0.04	670

*РБГ-радиоактивные благородные газы, **-долгоживущие радионуклиды

Таблица 10. Состав РБГ и йода в газообразных отходах АЭС

Нуклид	Относительное содержание, %					
	ВВЭР	PWR		РБМК	BWP	
⁴¹ Аг	0,2	0,03		0,3	—	
⁸⁵ Кг	6	1	4,6	0,7	2	12,8
^{85m} Кг	5,4	0,6		6,6	5	3,3
⁸⁷ Кг	1	0,4		13,4	12	10,2
⁸⁸ Кг	2,2	0,9		18,6	14	9,8
¹³³ Хе	72	90	85,8	35,2	14	11,7
^{133m} Хе	—	0,5		—	0,6	
¹³⁵ Хе	13,2	3,2	4,76	25,4	26	18,2
^{135m} Хе	—	0,8		—	4	8,4
Другие изотопы Хе	—	2,5		—	22,4	
Всего ИРГ	100	100		100	100	
¹³¹ И	58,9	98	30	23,8	12,7	9
¹³³ И	31,9	1		43,5	39,7	
¹³⁵ И	8,3	1		32,7	47,6	
Всего	100	100		100	100	

Активационные газы (⁴¹Аг, ¹⁴С, ^{13, 16}Н). ⁴¹Аг образуется при захвате нейтрона ядром ⁴⁰Аг. Обычно относительное содержание его в выбросах не превышает 0,3% общей активности. При этом активность ⁴¹Аг в газовых отходах достигает нескольких десятков терабеккерелей. Однако задержка, которой подвергаются газы сдувок из этого контура перед выбросом в систему вентиляции, значительно снижает их активность.

Радиоактивный углерод. ¹⁴С образуется на ядерных реакторах в результате реакций ¹⁴N(n,p)¹⁴С, при тройном делении; ¹⁷O(n,α)¹⁴С и ¹³С(n,γ)¹⁴С. На АЭС с реакторами ВВЭР выбросы ¹⁴С колеблются в диапазоне 0,22 - 0,67 ГБк/МВт.год. Выброс ¹⁴С из реакторов кипящего типа происходит в форме СО₂, СО, СН₄, С₂Н₆ и С₄Н₁₀, причем на долю СО₂, СО и углеводородов приходится соответственно 95; 2,5 и 2,5%. На реакторах с водой под давлением 80% СО приходится на долю СН₄ и С₂Н₂, на СО₂ и СО - менее 5%.

Углерод-14 в большом количестве накапливается в биосфере, замещая обычный углерод в органических соединениях. При распаде углерод превращается в азот и органическая молекула разрушается. Если это происходит в молекуле ДНК или РНК, должен произойти разрыв хромосомы, и возникнуть мутация. Установлено, что накопление углерода-14 ведет к замедлению роста деревьев. Сейчас в составе атмосферы количество ¹⁴С увеличено на 25% по сравнению с до атомной эрой [17].

Тритий в природе может существовать в газообразном виде и в окисленных формах НТО, Т₂О, может также входить в состав более сложных органических и неорганических соединений. Газообразная форма трития неустойчива. Она сравнительно быстро окисляется. На АЭС с ВВЭР и РБМК в теплоносителе тритий существует в основном в виде тритиевой воды, в продувочном газе - в газообразной и окисленной формах. В реакторе тритий образуется при тройном делении ядерного топлива; в результате реакции нейтронной активации Li и В, растворенных в теплоносителе первого контура; а также активации дейтерия, содержащегося в теплоносителе в качестве примеси (до 0,015%). Основным источником трития в теплоносителе реактора ВВЭР являются реакции ¹⁰В(n,2α)³Н и ⁶Li(n,α)³Н, а также выход трития за счет диффузии и из негерметических твэлов.

В АЭС с реакторами типа ВВЭР и РБМК за счет тройного деления в твэлах образуется около 0,37-0,74 ТБк/МВт.год трития. Для реакторов типа ВВЭР переход ³Н в жидкие и газообразные отходы принимают равным 74 и 7,4; для реакторов с кипящей

водой - 2,6 и 0,18 ГБк/МВт.год. Через оболочку из циркониевого сплава в теплоноситель вследствие диффузии поступает примерно 0,1% трития, находящегося под оболочкой. Если оболочка твэла сделана из нержавеющей стали, то скорость поступления трития в теплоноситель приблизительно в 10 раз больше.

Тритий может замещать водород во всех соединениях с кислородом, серой, азотом. А эти соединения составляют значительную часть массы животных организмов. Доказано, что он легко связывается протоплазмой живых клеток и накапливается в пищевых цепях. Когда тритий распадается, он превращается в гелий и испускает бета-излучение. Эта трансмутация должна быть очень опасной для живых организмов, т.к. при этом поражается генетический аппарат клеток.

Радионуклиды иода. При реакции деления, а также при распаде продуктов деления образуется несколько радионуклидов иода. Наибольший вклад в дозу облучения дают нуклиды с массовыми числами 129, 131, 132, 133, 134 и 135. Для всех из них за исключением ^{129}I (период полураспада 16 млн лет) в активной зоне реактора достаточно быстро устанавливается равновесное состояние. Попасть в окружающую среду радионуклиды иода могут только при разгерметизации оболочки твэла и первого контура. Как источник облучения наиболее важным нуклидом иода является ^{131}I . В равновесных условиях его активность колеблется от 0,92 до 1,1 пБк/МВт. ^{131}I может существовать либо в аэрозольной, либо в газовой форме. В отходах ^{131}I представлен молекулярным иодом и иодом в органических соединениях, главным образом в виде иодистого метила CH_3I . На реакторах с обычной водой 73% радионуклидов иода присутствуют в виде органических соединений, 22% иодноватистой кислоты, 5% элементарного иода. В выбросы ^{131}I из реакторов с кипящей водой и водой под давлением равны 74-185 и 1,85-22,2 МБк/МВт.год. Выбросы ^{131}I из реактора РБМК существенно ниже, чем из ВВЭР.

Радиоактивный иод вызывает нарушение гормонального уровня у человека, летаргию и ожирение.

Аэрозоли. Часть продуктов деления, продукты распада РБГ и нуклиды с наведенной активностью образуют аэрозоли, которые с воздушными потоками могут поступать во внешнюю среду. Количество таких аэрозолей зависит от типа реактора, его мощности, эффективности систем газоочистки, водоочистки и ограничивающих барьеров, продолжительности эксплуатации и т.п.

В составе аэрозолей, выбрасываемых из АЭС, идентифицируют несколько десятков радионуклидов. Типичные из них: ^{131}I , $^{89,90,91}\text{Sr}$, ^{103}Ru , ^{137}Cs , $^{141,144}\text{Ce}$, ^{51}Cr , $^{54,55}\text{Mn}$, ^{59}Fe , $^{58,60}\text{Co}$, ^{95}Zr , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, $^{22,24}\text{Na}$, ^{88}Rb , ^{99}Mo и др. Состав долгоживущих радионуклидов колеблется в широких пределах (10-80% общей активности) и зависит от состояния активной зоны. Активность отдельных радионуклидов изменяется от нескольких сотых до нескольких единиц гигабеккерелей в год. Суммарное содержание твердой фракции в выбросах на реакторах ВВЭР примерно 2.2 МБк/МВт(эл).год.

2.2.4 Нормирование выбросов радиоактивных газов в атмосферу.

Ограничение воздействия источников излучения на человека определены нормами радиационной безопасности (НРБ), основными дозовыми пределами и производными от них величинами. НРБ допускают облучение отдельных лиц из населения в пределах дозы (ПД), равной $5 \cdot 10^{-3}$, $1,5 \cdot 10^{-2}$ и $3 \cdot 10^{-2}$ Зв в год для I, II и III групп критических органов соответственно [18].

Кроме того, устанавливаются производные характеристики: предельно допустимые выбросы радиоактивных газов и аэрозолей в атмосферу и предельно допустимые сбросы жидких радиоактивных отходов во внешнюю среду. Санитарные правила устанавливают и среднемесячные допустимые выбросы газоаэрозольных и годовые допустимые сбросы жидких радиоактивных отходов АЭС во внешнюю среду, действующие в период нормальной эксплуатации АЭС. При этом учитываются все возможные пути воздействия радиоактивных отходов на человека (внешнее облучение, внутреннее облучение в

результате ингаляционного поступления радионуклидов в организм, с водой и по пищевым цепочкам), географические, метеорологические и другие факторы. В соответствии с санитарными правилами устанавливаются среднесуточный и среднемесячный допустимый выброс радиоактивных газов и аэрозолей в атмосферу (Табл.11 и 12).

Таблица 11. Среднесуточный допустимый выброс

Нуклид	N=1000МВт	N = 6000 МВт
РБГ (любая смесь), ГБк/ [МВт сут]	18,9	111
¹³¹ I (газовая и аэрозольная фазы), ГБк/[МВт сут)	0,37	2,22
Смесь долгоживущих нуклидов, ГБк/[МВт•сут]	0,555	3,33
Смесь короткоживущих нуклидов, ГБк/[МВтсут)	7,4	44,4

Таблица 12. Среднемесячный допустимый выброс

Выброс	⁹⁰ Sr	⁸⁹ Sr	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn	⁵¹ Cr
N= 1000 МВт(эл.), ГБк/ [мес.1000 МВт]	0,0555	0,555	0,555	0,555	0,555	0,555
N ≥ 6000 МВт (элЛ, ГБк/(месАЭС)	0,333	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33

При этом предполагают, что этот выброс не приведет на местности к дозе, превосходящей предельно допустимую. Разделение допустимого выброса на среднесуточные и среднемесячные связано с трудностями определения удельной активности ряда радионуклидов (например, ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr и др.) в пробе выброса, отобранной за одни сутки. СП АЭС разрешают однократно превысить в 5 раз среднесуточный ДВ при условии, что суммарный выброс за квартал или за год соответственно не превзойдет соответствующего расчетного значения.

Современная деятельность российских предприятий атомной энергетики не выходит за границы строго регламентированных норм воздействия. Радиоактивные выбросы и сбросы предприятий ЯТЦ существенно ниже допустимых. В последние годы на всех АЭС выбросы по инертным радиоактивным газам и долгоживущим радионуклидам не превысили 3%, а сбросы радионуклидов составляли 40 - 50% от допустимой величины. Концентрации радионуклидов в воздухе в районах расположения АЭС на 5 - 6 порядков ниже допустимых, что исключает даже теоретическую возможность их вредного воздействия на человека и живую природу.

2.3 Радиоактивные выбросы тепловых электростанций

При оценке возможного увеличения производства электроэнергии на тепловых электрических станциях следует иметь в виду, что помимо положительного аспекта, связанного с наличием больших запасов органического топлива, главным образом каменного угля, существуют и не менее важные экологические аспекты, которые становятся определяющими при формировании энергетической стратегии.

В условиях нормального режима работы ТЭС выбрасывает в атмосферу огромные массы химических загрязняющих веществ: аэрозоли, оксиды углерода, азота, серы, формальдегид, бензапирен, ряд тяжелых металлов, обладающих канцерогенными и мутагенными свойствами. При этом возникают как локальные (загрязнение воздуха в городах и ухудшение здоровья населения), так и региональные экологические проблемы (кислотные дожди, парниковый эффект). В отличие от АЭС, выбросы которых строго регламентированы и подлежат жесточайшему контролю, функционирование ТЭС сопровождается нарушением нормативов выбросов.

Вещества, выбрасываемые ТЭС, относятся к числу приоритетных токсичных примесей в воздухе многих городов России. Расчеты рисков смерти для населения от воздействия воздуха, загрязненного взвешенными веществами, в городах с крупными угольными ТЭС показали, что индивидуальные годовые риски находятся на уровне 10^{-3} - 10^{-4} . (Риск здоровью населения, проживающего вблизи АЭС, составляет $5-7 \cdot 10^{-7}$).

В процессе сжигания угля на ТЭС происходит обогащение золы радионуклидами. Максимальные удельные радиоактивности при сжигании подмосковных углей могут превысить 370 Бк/кг. Опасность для окружающей среды, особенно при повышенной радиоактивности золы, может представлять пылеунос с золоотвалов или выброс естественных радионуклидов с дымовыми газами ТЭС. Содержание урана в каменном угле колеблется от 50 до 90 Бк/кг. При сжигании этих углей на ТЭС возрастает содержание в ней ^{226}Ra и ^{210}Pb . В пробах золы по сравнению с топливом содержание свинца-210 увеличивается в 5-10 раз, а ^{226}Ra - в 3,5-6 раза. Нелетучие компоненты (^{226}Ra , ^{232}Th) при сгорании угля остаются в шлаке - соотношение их содержаний в шлаках и углях составляет 3:1. Одним из компонентов радиационного фона в цехах ТЭС является γ -излучение углей, шлаков и золы, обусловленное содержащимися в них радионуклидами семейства урана и тория, а также калием-40. В отдельных точках ТЭС возникают участки с повышенным гамма-излучением. Диапазон средних концентраций в воздухе составляет 60-90 мБк/куб.м. На отдельных ТЭС загрязненность золошлаковых отходов при сжигании некоторых углей, например, подмосковных, повышена и достигает 520 Бк/кг при нормативе их бесконтрольного использования в строительстве 370 Бк/кг.

Таким образом, угольные ТЭС выбрасывают больше радиоактивных веществ, чем АЭС. Эффективный дозовый эквивалент для населения угольных ТЭС в 100 раз больше, чем от АЭС. Тонна угля содержит в среднем 1,3 части на миллион (ppm) природного урана и 3,2 ppm тория.

Опасны и ТЭС, работающие на горючих сланцах. Так, Прибалтийская ТЭС выбрасывает в атмосферу до 90% урана, от 28 до 60% радия и до 78% тория. Помимо аэрозольного компонента в выбросах присутствует 20% летучей золы. В результате деятельности ТЭС вокруг нее образовалась зона повышенных концентраций естественных радионуклидов с радиусом 40 высот труб станции. В указанной зоне произошло увеличение концентраций естественных радионуклидов на порядок для верхнего слоя почвы. Концентрация естественных радионуклидов в факеле составляет 50 мкБк/куб.м радия, 10 мкБк/куб.м тория и 100 мкБк/куб.м урана при фоне 1 мкБк/куб.м воздуха.

Сравнение АЭС с ТЭС показывает, что радиоактивное загрязнение территории вокруг АЭС значительно меньше, чем ТЭС. Коллективные дозы облучения населения при производстве электроэнергии различными способами (на 1 ГВт(эл).год) составляют:

угольная энергетика	4,0 челЗв
атомная энергетика	3,0 челЗв
энергетика на топливе и геотермальных водах	2,0 челЗв
на нефти	0,5 челЗв
на газе	0,03 челЗв

Латентная смертность населения (число смертей на 1 ГВт выработанной энергии в год) вокруг электростанций

Тип электростанции	Смертность
АЭС	0.0007-0.17
Угольные ТЭЦ	4,9-73.7
Угольные ТЭЦ с кипящим слоем	1,23-23,2
Газовые ТЭЦ	0,09-6,5
Газовые ТЭЦ с парогазовыми турбинами	0,01-0,28

2.4 Криптон-85 в атмосфере Земли

В настоящее время основным техногенным радионуклидом, содержащимся в атмосфере Земли, является ^{85}Kr . ^{85}Kr является β -излучающим продуктом деления с периодом полураспада 10,7 года. Криптон трудно улавливается фильтрами и очень подвижен в атмосфере. Масштабы образования ^{85}Kr на несколько порядков выше, чем всех остальных радионуклидов - 375 Ки-МВт.год. Количество криптона-85 в атмосфере ежегодно увеличивается. Сейчас содержание ^{85}Kr в атмосфере в миллионы раз выше, чем до начала атомной эры. Из-за инертности благородных газов этот радионуклид имеет тенденцию к накоплению в атмосфере в концентрации, определяемой скоростью его поступления в атмосферу, метеорологической диффузией и радиоактивным распадом для любой заданной точки. Ни мировой океан, ни поверхность земли (почва) не являются значительными поглотителями этого вещества.

В природе ^{85}Kr , образуемый при спонтанном делении урана и в результате атмосферных реакций, индуцированных космическим излучением, наблюдается лишь в пренебрежимо малых количествах. Однако в последние годы его содержание существенно возросло из-за образования этого нуклида при ядерных испытаниях и производстве ядерной энергии. После прекращения ядерных испытаний ^{85}Kr поступает в атмосферу в основном при переработке ядерного топлива, а также в меньших количествах – при эксплуатации атомных электростанций.

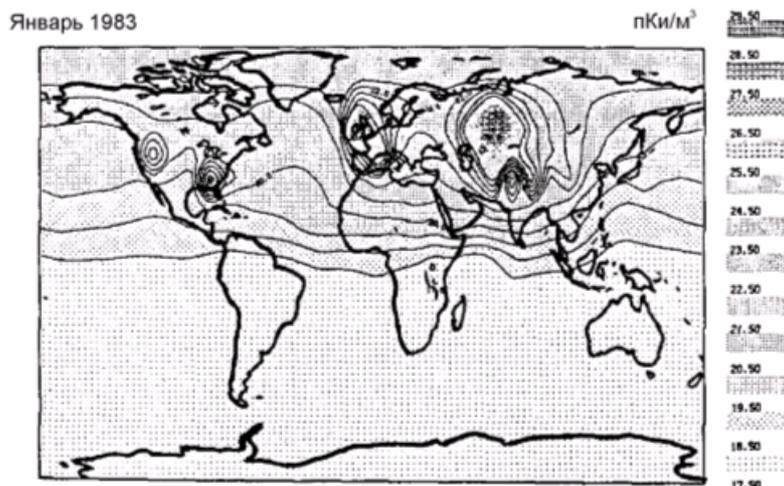
Модель распространения криптона в атмосфере рассматривает четыре фазы переноса и рассеяния выброшенного ^{85}Kr [19].

Фаза 1 – вблизи источника: первые шесть часов распространения шлейфа ^{85}Kr или расстояния около 100 км (для определения количества вещества, переносимого за год в выделенных секторах, используется местная роза ветров пропорционально частоте, с которой в каждом секторе дует ветер).

В фазе 2 для оценки диспергирования выбрасываемого вещества за время переноса до 5 сут и на расстояние до нескольких тысяч километров используют климатологию воздушных траекторий.

Фаза 3 обусловлена остатками прохождения первичного шлейфа вокруг земли (около 30 сут). В этой фазе для оценки поперечного расширения шлейфа относительно средней траектории, соответствующей характеристикам циркуляционных потоков в нижних слоях атмосферы, используется эффективный коэффициент диффузии (зависящий от времени). По этой траектории шлейф переносится от восточного побережья США через Атлантику в Европу, Азию, Тихий океан и назад в Северную Америку.

Фаза 4 (свыше 30 сут) включает модель глобальной диффузии, в которой предполагается равномерное распределение ^{85}Kr по географическим широтам. В фазе 4



продолжается разбавление из-за перемешивания в направлениях север - юг и поперек движения шлейфа ^{85}Kr . Примерно через два года ^{85}Kr практически равномерно распределен в атмосфере, так что последующие изменения концентрации целиком определяются радиоактивным распадом.

Рис.6 Распределение криптона-85 по земному шару (1983 г.)

Криптон как химический элемент не вовлекается в биологические процессы. Однако он поглощается тканями тела при дыхании и хорошо растворяется в жировых тканях человека и животного. Уже поэтому испускаемая им радиация должна оказывает влияние на биологические процессы, например, блокируя электропроводность тканей. Малые дозы облучения ^{85}Kr повышают частоту рака кожи. Опасен он для беременных. Особенно отмечается роль ^{85}Kr в изменении электропроводности атмосферы, что может вызвать серьезные геофизические эффекты, например, уменьшение электрического заряда Земли и изменение магнитного поля, уменьшение электрического сопротивления атмосферы между океанами и ионосферой, увеличение электризации гроз, изменение характера осадков, увеличение числа смерчей и торнадо.

2.5 Выбросы при авариях на предприятиях ядерного топливного цикла.

Крупные аварии возникают на атомных установках сравнительно редко. Однако их воздействие на население трудно переоценить. Наиболее значительные аварии на АЭС представлены в Табл. 13 [2]:

Таблица 13. Опасные аварии на атомных электростанциях

Место аварии	Дата	Причина	Выброс радиоактивности, кюри	Площадь загрязнения, км	Число пострадавших	
					эвакуант	погибших
Кыштым, Южный Урал	1957	Взрыв хранилища	2*10, в т.ч. 5,4*10 кюри стронция	15000	100*10	-
Виндскэйл, Англия	1957	Горение графита	3*10, в т.ч. 2*10 кюри	500	-	-
Три Майл Айленд, шт. Пенсильвания, США	28 марта 1979	Расплавление активной зоны	20 кюри иода-131	-	-	-
Чернобыль, СССР	26 апреля 1986	Разгон реактора	100*10 в т.ч. ~15*10 кюри иода-131	20000	120*10	30

Из этой таблицы видны масштабы воздействия аварий выбросов значительных количеств радиоактивных веществ, загрязнение больших массивов территорий переселение огромных масс людей. Видно также и то, что такие катастрофы сопровождаются сравнительно небольшим числом жертв, погибающих в течение нескольких недель после аварии. Главные компоненты ущерба таких аварий - социальные и экономические потери.

При максимальных авариях главная опасность для здоровья исходит от продуктов деления (иод-131 и цезий-137). Они биологически активны, и при попадании в организм вместе с пищей, задерживаются в нем. ^{131}I ($T_{1/2}=8$ дней) опасен в течение первого месяца после аварии (именно ^{131}I вызывал раковые образования щитовидной железы после Чернобыльской аварии). ^{137}Cs ($T_{1/2}=31$ год) потенциально опасен в качестве примеси в травах на пастбищах и в зерновых культурах. Также опасен и изотоп ^{134}Cs , который имеет ($T_{1/2}=2$ года). В то время как опасное воздействие ^{131}I может быть уменьшено специальными мерами (эвакуацией населения с загрязненных территорий на несколько недель, йодной профилактикой), радиоактивный цезий препятствует производству продовольствия на загрязненных землях в течение долгого времени. Другие изотопы, присутствующие в активной зоне реактора, образуются не в таких больших количествах и не являются биологически активными (стронций, теллур-132, трансурановые элементы).

Суммарная активность выброса при аварии на Чернобыльской АЭС составила 50 МКи (без инертных газов) – около 4% общей активности топлива в реакторе. Состав выброса (табл. 14) в целом соответствовал изотопной структуре топлива в реакторе, в

котором преобладали короткоживущие радионуклиды, в первую очередь ^{131}I . Из долгоживущих радионуклидов в составе выброса преобладал ^{137}Cs . ^{90}Sr ($T_{1/2}=28$ лет) было значительно меньше. Еще меньше было ^{239}Pu ($T_{1/2}=24380$ лет), представляющего наибольшую опасность в долгосрочном плане и входящего в состав горячих частиц, отличающихся чрезвычайно высокой удельной активностью.

Большая высота радиоактивного выброса (до 2 км) и изменчивость метеорологической обстановки в период 26.04 – 10.05 1986 г. (прежде всего изменение направления ветра на 360°) определили особенности последующего выпадения радиоактивных материалов на почву и воду, а также характер загрязнения территории (прежде всего его огромную площадь). Радиоактивные выпадения были зарегистрированы на удалении более 2 тыс. км от места аварии, затронув в той или иной степени территорию по крайней мере 20 государств. Только на территории Белоруссии, Украины и России загрязнению цезию-137 с плотностью выпадений свыше 1 Ки/км² подверглась территория 131 тыс. км² с населением около 4 млн человек, в том числе около 1 млн детей.

Вторая особенность выброса – неравномерность загрязнения территории радионуклидами. Наибольшее загрязнение стронцием-90 и плутонием-239 обнаружено в радиусе 30 км от места аварии. Однако и в 30-километровой зоне, и за ее пределами плотность радиоактивного загрязнения отличалась в 10 и более раз.

Особенно тяжелое последствие чернобыльской катастрофы – значительное ухудшение состояния здоровья большого количества людей и многочисленные жертвы. По состоянию на конец лета 1986 г. погиб 31 человек, в т.ч. шестеро пожарных. Более 200 человек были госпитализированы с диагнозом лучевая болезнь. По разным оценкам число умерших от чернобыльской катастрофы составляет от трех до десяти тысяч человек. Полная коллективная эквивалентная доза для населения всех стран мира, подвергшихся радиоактивному загрязнению, составляет 600 тыс. чел-Зв. Из них 240 тыс. чел-Зв (40%) приходится на страны СНГ. В два раза увеличилась заболеваемость раком щитовидной железы, заболеваемость злокачественными новообразованиями возросла на 20%. В настоящее время смертность среди ликвидаторов в Чернобыле не превышает среднестатистических показателей для тех же возрастных групп. Всплеск (но не смертность) наблюдается лишь в лейкозах и в заболеваниях щитовидки у детей.

Таблица 14. Изотопный состав выброса аварийного блока Чернобыльской АЭС

Изотоп	Активность выброса, МКи, 26.04.1986	Активность выброса, МКи, 6.05.1986
Ксенон-133	5	45
Криптон-85	-	0.9
Йод-131	4.5	7.3
Теллур-132	4	1.3
Цезий-134	0.15	0.5
Цезий-137	0.3	1.0
Молибден-99	0.45	3.8
Цирконий-95	0.45	3.2
Рутений-103	0.6	1.6
Барий-140	0.5	4.3
Церий-141	0.4	2.8
Церий-144	0.45	2.4
Стронций-89	0.25	2.2
Стронций-90	0.015	0.22
Плутоний-238	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Плутоний-239	$1 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Плутоний-240	$2 \cdot 10^{-4}$	0.001
Плутоний-241	0.02	0.14
Плутоний-242	$3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Кюрий-242	0.003	0.021
Нептуний-239	2.7	1.2

3. Особенности радиационной обстановки в приморских регионах

С точки зрения экологической радиохимии, морские прибрежные регионы обладают рядом особенностей. Прежде всего – это густонаселенные местности (особенно это касается таких южных морей, как Черное, Азовское и Средиземное моря). Многие прибрежные города – центры с развитой промышленностью, городским транспортом, грузовыми (в том числе – нефтеналивными) портами. В результате прибрежные воды оказываются сильно загрязненными муниципальными и промышленными стоками. Сильное загрязнение вызывает и сельскохозяйственная деятельность, которая на побережье южных морей обычно весьма интенсивна. В тоже время пляжи и побережье – зоны отдыха. Многочисленные курорты принимают большое количества женщин и детей (т.е. групп населения повышенного риска).

Обычно прибрежные регионы характеризуются высокой влажностью, резким перепадом атмосферного давления и частой сменой направления и силы ветра. В результате прибрежная зона оказывается то в зоне действия сухопутных аэрозолей, несущих как продукты распада изотопов радона, так и продукты газообразных сбросов атомных электростанций, то в зоне действий морских аэрозолей, несущих соли калия (содержащие жесткий гамма излучатель - ^{40}K) и продукты промышленных стоков предприятий ядерно-топливного цикла, попадающие в морскую воду с речными стоками. В дозовую нагрузку существенный вклад вносят горные породы и почва, на которой расположены строения, а также строительные материалы. В некоторых регионах приходится учитывать деятельность грязевых вулканов - подводных источников радона.

Примером является акватория Азовского моря. Проблему радиозащиты этого региона обычно связывают с наличием активных подводных грязевых вулканов (например, на траверсе станицы Голубицкой, недалеко от устья реки Кубань), глобального геологического разлома, пересекающего все Азовское море и создающего сейсмическую активность Крыма, стока рек Кубань (фосфорные удобрения с высокой радиоактивностью совместно с другими вредными компонентами рисоводства) и реки Дон (в частности, несущей продукты сбросов Воронежских АЭС). Азовское море малосоленое и достаточно замкнутое. Оно отделено от более соленого (и, следовательно, содержащего большую концентрацию ^{40}K) Черного моря узким и мелким Керченским проливом [20].

4. Экологическая обстановка на Северном побережье Азовского моря

С точки зрения оценки химического и радиологического риска особый интерес представляет северное побережье Азовского моря, для которого характерна большая плотность населения (гг. Таганрог, Мариуполь и Бердянск), сильно развитая промышленность, развитая курортная база и поэтому существует настоятельная необходимость создания долгосрочных прогнозов влияния радиационной обстановки на здоровье жителей и отдыхающих.

В ходе экспедиций, проводимых кафедрой радиохимии химического факультета МГУ, проводимых с 1982 года [20-23], было установлено, что в настоящее время экологическая обстановка в северной части Азовского моря постепенно ухудшается. Побережье на участке г.Таганрог-г.Мариуполь-г.Бердянск загрязняется муниципальными стоками, газовыми выбросами и стоками металлургических комбинатов, выносами реки Дон и интенсивным бурением дна моря при поисках природного газа. В городах региона химические токсины (CO , диоксины, свинец) активно нарабатываются городским транспортом. На фоне химического загрязнения особо опасным представляется загрязнение региона природными и техногенными радионуклидами.

На северном побережье Азовского моря существует несколько источников поступления радионуклидов в среду обитания человека. В первую очередь сюда относятся

концентрация на местных пляжах в результате береговых процессов минералов (например, «черных песков»), содержащих аномально высокие концентрации естественных радионуклидов (уран, торий и продукты их распада). Зачастую локальные зоны отложений располагаются в местах массового, в том числе и детского отдыха, что представляет несомненную опасность для отдыхающих. Черные пески используются для строительства жилых помещений, существенно увеличивая тем самым дозовую нагрузку на население за счет бытового радона. Смешение пресных (речных) и соленых (морских) вод вблизи северного побережья Азовского моря приводит к флуктуациям солености воды и, следовательно, флуктуации активности ^{40}K - жесткого гамма-излучателя. Выносы ветрами радиоактивных аэрозолей калия существенно влияют на радиационную обстановку в прибрежной полосе. Наконец, следует учитывать, что северное побережье Азовского моря находится в зоне влияния Хмельницкой и Воронежской атомных электростанций. Из-за отложения аэрозолей, образующихся при эксплуатации ядерных реакторов, можно ожидать загрязнения побережья техногенными радионуклидами (главным образом, радиоактивными изотопами цезия).

4.1 Экология г. Мариуполя и прилегающих регионов (курортной зоны)

Город Мариуполь – крупнейший промышленный центр. Территория города составляет 157,6 кв.км., население 504 тыс. человек. Близость Донецкого каменноугольного бассейна, удобные морская и железнодорожная связь с сырьедобывающими и топливодобывающими районами обусловили развитие города как одного из крупнейших металлургических центров. Крупнейшими промышленными предприятиями являются два металлургических комбината, коксохимический завод, машиностроительное предприятие. Мариупольский порт – самый крупный порт на Азовском море. Пятнадцать причалов порта принимают к грузопереработке уголь, металлы, зерно, продовольствие и химические грузы.

Основной экологической проблемой г. Мариуполя является высокое загрязнение атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий. До 1990 г. металлургическими предприятиями города выплавлялось 13 млн. т. стали. Выбросы в атмосферу от всех предприятий города достигали 610 тыс. т в год. К 1996 г. объем производства снизился и выбросы в атмосферу составили 340 тыс. т/год. К 1997 г. намечился некоторый рост металлургического производства, выбросы в атмосферу также несколько увеличились и составили 350,3 тыс. тон. По загрязнению воздушного бассейна г. Мариуполь относится к самым неблагоприятным городам Украины. Положение усугубляет весьма неблагоприятное расположение металлургических предприятий практически в центре города. Данные многолетних наблюдений [20] свидетельствуют, что загрязнение атмосферного воздуха пылью и газообразными примесями превышает предельно допустимые концентрации в 3 - 5 раз.

Кроме неблагоприятных антропогенных факторов есть и опасные природные факторы: оползневые явления и подтопления, а также радиоактивные «черные пески». На северном побережье Азовского моря очень часты сильные ветры, которые иногда принимают характер пыльных бурь, поднимающих большие массы песка, что влияет на экологическую ситуацию в регионе. Побережье загрязняется муниципальными стоками, выносами реки Дон и продуктами интенсивного бурения дна моря при поисках природного газа.

Отсутствие хотя бы одного из этих факторов снимало бы проблему или, по крайней мере, делало бы ее несущественной, но именно совместное их присутствие создает ситуацию чрезвычайно опасную и не имеющую аналогов.

4.2 Радиэкология побережья Азовского моря

Изменения радиационной обстановки в районе Северной части Азовского моря могут быть вызваны следующими причинами:

- 1) Переменная интенсивность космического излучения (прохождение Землей космических радиационных полей, вспышки на Солнце, рождение звезд и т.п.).
- 2) Процессы смешения пресных и соленых вод вблизи северного побережья Азовского моря. Смешение вод приводит к изменениям солености воды и, следовательно, флуктуации активности ^{40}K - жесткого γ -излучателя. Выносы ветрами радиоактивных аэрозолей (капелек морской воды с растворенными в ней солями радиоактивного калия) существенно изменяют радиационную обстановку в прибрежной полосе.
- 3) Бурение и разработка месторождений природного газа в акватории северной части Азовского моря, сопровождающиеся выбросами радиоактивного инертного газа - радона (^{222}Rn) и продуктов его распада.
- 4) Поступление в атмосферу радона и радия совместно с газовыми и аэрозольными выбросами металлургических предприятий г. Мариуполя и выделение радона из отвалов переработанной руды и каменноугольных шлаков металлургических производств и систем энергоснабжения.
- 5) Выделение радона из почвы, карьеров по разработке гранитов, из подвалов, строительных материалов, колодцев и т.п.
- 6) Выделение короткоживущего изотопа радона - торона (^{220}Rn) и продуктов его распада из "черных" песков (ториевых минералов, например, монацита), покрывающих местами местные пляжи. Мелкие, пылевидные частицы черного песка поднимаются юго-восточными ветрами. Типичные для этих мест частые сильные ветры, принимающие характер пыльных бурь и поднимающие большие массы песка, существенно влияют на радиационную обстановку побережья.
- 7) Поступление радиоактивных аэрозолей выделившихся в окружающую среду в ходе эксплуатации атомных электростанций (Хмельницкая, Ровенская, Центрально-Украинская и Воронежская АЭС).
- 8) Влияние на радиационную обстановку последствий Чернобыльской катастрофы.

4.2.1 Черные пески на пляжах Азовского моря

На северном побережье Азовского моря основной источник поступления радионуклидов в среду обитания человека связан с концентрированием на местных пляжах минералов, содержащих естественные радионуклиды (уран, торий и продукты их распада). Внешне это проявляется в наличии на песчаных пляжах пятен и полос черного цвета. В зонах накопления радионуклидов ионизирующее излучение может превышать нормальный фон в десятки раз. Зачастую локальные зоны отложений располагаются в местах массового, в том числе и детского отдыха, что представляет несомненную опасность для отдыхающих. Природные источники радиоактивного излучения обнаружены как на северном, так и южном берегу Азовского моря. Связано это с геологическим разломом между плитами коренных пород, пересекающих Азовское море в меридиональном направлении на глубине порядка одного километра. В ходе геологических подвижек, плиты наезают друг на друга, крошатся, обломки пород выносятся на дно моря, а затем в виде песка выбрасываются на берег. На характер расположения черных песков по пляжу существенное влияние оказывают штормы, особенно в зимний период. Площадь пляжа, занятая под радиоактивные пески из года в год остается постоянный, но сами скопления изменяют свои местоположения.

В 1997 г. общая площадь загрязнения мариупольского пляжа черными песками, составляла 96 кв.м, в 1998 г. – 360 кв.м. Непосредственно на поверхности "черного песка" уровни радиации имеют значения от нескольких сотен мкр/час до тысячи мкр/час, в зависимости от толщины слоя и степени обогащения радионуклидами, но уже в нескольких метрах от пятна на обычном пляжном песке принимают нормальные значения (17 мкр/час). Толщина слоя черного песка непосредственно на пляже обычно не превышает одного метра [21].

4.2.2 Радиоактивность черных песков

Результаты измерений гамма излучения проб песка, взятых в на различных участках побережья, приведены в Табл.15 (в единицах микрорентген в час). Кроме того, измеряли энергетический спектр гамма излучения. Типичный спектр гамма-излучения пробы черного песка представлен на Рис.7. Он состоит из большого числа линий, указывающих на наличие в минералах многих радиоактивных элементов. Анализ спектров с помощью таблиц энергий гамма-излучения известных изотопов показал, что природные изотопы в черных песках, можно сгруппировать в два семейства: тория-232 (основная часть) и урана-238 (как примесь: содержание урана примерно в 20 раз меньше содержания тория). Минералогический и химический составы черных песков представлены в Табл.16.

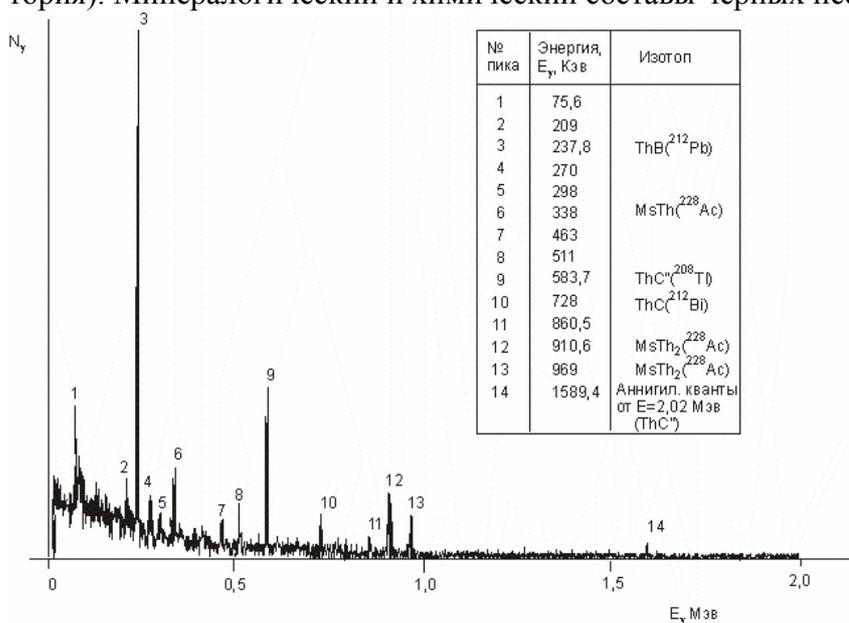


Рис.7 Энергетический спектр гамма-излучения (по оси абсцисс – энергия γ -излучения, по оси ординат – интенсивность излучения).

Таблица 15. Общая гамма-активность проб черных песков, отобранных в различных регионах.

Из данных гамма-счета	Торий-232, мкР/ч	Уран-238, мкР/ч
Таганрог	9240±138	698±42
Мариуполь	777±276	1459±78
Бердянск	1548±45	360±13

Для сравнения: средняя радиоактивность обычного песка: 17 мР/час.

4.2.3 Химический и минералогический состав черных песков

Основным компонентом радиоактивных песков является минерал монацит (фосфат тория). Кроме того, они в достаточно больших количествах содержат железо и титан [22].

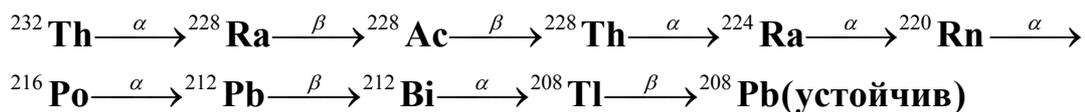
Таблица 16. Минералогический и химический состав различных фракций черных песков, разделенных методом магнитной сепарации, их полная и α -активность.

Фракция	Массовая доля, %	Скорость счета, сек ⁻¹	Доля α -активности, %							
1. Ферромагнитная фракция (Магнетит Fe ₃ O ₄)	0.38	0.017	0.2							
2. Парамагнитная сильная (Ильменит FeNiO ₃)	50.6	0.045	0.6							
3. Парамагнитная средняя (Ильменит, гранат Fe ₃ Al ₂ [SiO ₄])	12.5	0.120	1.5							
4. Парамагнитная слабая (Монацит (Ce, La, Th)[PO ₄], фосфат тория ThPO ₄).	8.5	7.613	97							
5. Немагнитная фракция (Апатит, рутил, циркон, кианит)	28.0	0.044	0.6							
Состав фракции										
Элемент	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
% элем.	1.054	35.643	0.652	1.730	0.834	0.855	27.827	0.878	1.305	29.224
атом %	1.524	49.476	0.793	1.903	0.831	0.832	22.652	0.926	0.926	20.403

Данные минералогического анализа показали (Табл.16), что основным компонентом радиоактивных песков является минерал монацит (фосфат тория), кроме того, пески в достаточно больших количествах содержат железо и титан. Содержание тория – менее процента, но именно он определяет радиоактивность черных песков.

4.2.4 Экологическая опасность черных песков.

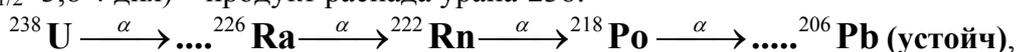
Лабораторное исследование [22] показало, что основным источником излучения черных песков является ^{232}Th и продукты его распада. Несколько упрощенно (без ветвлений) схему радиоактивных превращений в семействе тория можно представить в виде:



Долгоживущий торий-232 последовательно распадается на ряд элементов. Практически все продукты распада ториевого ряда – металлы, они прочно удерживаются в кристаллической решетке и не покидают минералы. Но один из продуктов – радон-220 – тяжелый радиоактивный инертный газ. Он способен покинуть песок и выделять в окружающее пространство.

Именно радон представляет реальную опасность для населения и отдыхающих на курортах Мариуполя-Бердянска. Дело в том, что строительство жилых домов и домов отдыха ведется с использованием местных песков, включающих в себя радиоактивные пески. Радон выделяется из строительных конструкций, переходит в воздух помещений и попадает в легкие отдыхающих. Особенно легко радон выходит из пено-бетона и штукатурки. Радон – альфа-излучатель. Эффективность альфа-излучения с точки зрения разрушения биологических тканей в десять раз превышает эффективность бета- или гамма-излучения. Сам радон-220 (торон) – коротко живущий элемент ($T_{1/2}=58$ сек), но продукты его распада – сравнительно долгоживущие (более 10 часов). Продукты распада торона оседают на стенках легких и создают дополнительное долговременное облучение. Поэтому попадание торона внутрь организма приводит к серьезным последствиям, в частности, - к такому смертельному заболеванию, как рак легких.

Помимо радона-220, из черных песков выделяется, «обычный» радон-222. Радон-222 ($T_{1/2}=3,8$ 4 дня) – продукт распада урана-238:



но в черных песках, его значительно меньше, чем торона. В этом состоит уникальность радиационной обстановки региона Мариуполя-Бердянска. Дело в том, что в почве и строительных материалах во всем мире, «бытовой» радон связан именно с радоном-222. Лишь в двух регионах земного шара: в жилой застройке южных островов Японии и на северном побережье Азовского моря радон-220 представляет собой серьезную угрозу населению. Другим путем поступления радона в среду обитания человека является вода колодцев. Стенки многие колодцев на побережье выкопаны в песчаниках, содержащих прослойки черных песков. Радон хорошо растворим в воде, продукты его распада легко переходят в питьевую воду и с ней поступают в организм человека. Третьим путем, является накопление тяжелого радона в подвалах, из которых, через щели в полу, он проникает в жилые помещения.

Таким образом, опасность черных песков связана в основном с возможностью внутреннего облучения человека радоном (в данном случае – радоном 220) и продуктами его распада, которое может значительно превышать внешнее, так как при внутреннем облучении будет существенно проявляться альфа-составляющая излучения, биологическая эффективность которого несравненно выше. Повышенная опасность попадания радиоактивной пыли в легкие обусловлена двумя компонентами:

- радиоактивными газами (радон-220, радон-222);

- пылевидными частицами черного песка, которые поднимаются сильными ветрами.

4.3 Климатические особенности региона

Климат в районе г. Мариуполя умеренно-континентальный со среднегодовой температурой воздуха +9° С и среднегодовым количеством осадков 460 мм. Наблюдается резкое различие погодных условий зимнего и летнего периодов. Зимой регион попадает в зону влияния юго-западной периферии Сибирского антициклона: преобладают сильные холодные ветры с востока и минимальными температурами до -30°С. Морозный период приходится на декабрь-март. Море в этот период покрывается льдом. Сильные ветры достигают 15-18 м/с (при среднемесячных значениях в этот период 6-7 м/с).

В летний период территория города и Азовское море находятся под влиянием Азовского субтропического максимума. Теплый период года может быть сухим и жарким с максимальными температурами до +40° С и среднемесячными от +19°С до +23° С. В теплый период года в целом небольшое преобладание волнений от северо-восточных и восточных ветров сохраняется. Но это преобладание относится к весне и осени. В летний период шторма вызываются ветрами юго-западного и западного направлений. В весенне-летний период среднемесячная скорость ветра составляет 4-5 м/с редко достигая 8 м/с. В конце весны и начале лета преобладают штормы с юго-запада и запада. Повторяемость штормов этих направлений в мае-июле составляет 45-58%. На северном побережье Азовского моря очень часты сильные ветры, которые иногда принимают характер пыльных бурь, могут поднимать большие массы песка и влиять на радиационную ситуацию не только непосредственно побережья, но и других областей [20,23].

4.4 Экологический риск жителей региона.

Попадание радиоактивных эманаций и аэрозолей внутрь организма является серьезным фактором онкологических заболеваний. Существует большая вероятность, что повышенная онкозаболеваемость (Табл.17) среди жителей побережья может быть связана с наличием "черных песков".

Таблица 17. Средние за 7 лет показатели онкозаболеваемости по Першотравневому району в пересчете на 1000 человек населения. [23]

Поселок	Общая онкозаболеваемость	Заболеваемость раком легких
Мангуш	3.12	0.72
Ялта	3.93	0.78
Урзуф	3.21	0.9
Юрьевка	6.17	3.3
Портовское	2.43	1.7
Б.Коса	3.06	1.95
Мелекино	4.38	1.05
Ильичевка	2.01	0.86
Бердянское	2.86	0.75
Приазовское	3.55	1.29
Азовское	3.28	2.1
Камышеватка	3.5	0.98
Демьяновка	3.67	2.26
Стародубовка	2.34	1.65
Захарьевка	3.58	3.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Экспериментальные данные

В настоящей работе проводилась статистическая обработка временных вариаций измерений гамма-фона, проводившихся в г. Мариуполе в 1988-2003 годах. Основное внимание уделено сравнению статистических характеристик флуктуаций радиационного поля со статистическими характеристиками флуктуаций локальных климатических условий (метеорологических параметров): температуры, атмосферного давления, направления и силы ветра, относительной влажности воздуха. В задачи работы входило как исследование влияния климатических параметров друг на друга, так и на радиационный фон (в отдельности и одновременно).

Радиометрический мониторинг осуществлялся сотрудниками СЭС г. Мариуполя с использованием радиометра типа СРП-86Н на высоте 1 м над уровнем почвы 1 раз в сутки (в 12 часов дня). В нашем распоряжении имелась совокупность чисел - данных по ежедневному измерению интенсивности радиационного поля (в микрорентгенах/час), начиная с 1-го января 1988г и кончая 31 декабря 2003г (всего 5843 измерений за 16 лет).

Измерения метеорологических параметров (с 01.01.96 по 31.12.96) проводили сотрудники Морской гидрометеостанции г. Мариуполя. Климатические параметры (температура воздуха (в°С), атмосферное давление (мм.рт.ст.), скорость (м/с) и направление ветра (градусы), абсолютная (%) и относительная влажность (% от максимальной влажности, возможной при данной температуре) измеряли 8 раз в сутки: в 0, 3, 6 часов и т.д. с интервалом в три часа (всего 2928 измерений каждого параметра).

Приведенные данные не лишены недостатков. Так, по радиационному фону имели место кратковременные (до нескольких дней) пропуски данных, приходящиеся преимущественно на праздничные дни. Соответствующие недостающие данные получали линейной экстраполяцией соседних значений. Измерение фона проводилось один раз в сутки, что не дало возможности изучить характер суточного колебания интенсивности радиационного поля. Обращает на себя внимание и небольшое количество данных по климатическим параметрам (один год), что не позволило провести анализ флуктуаций климатических параметров на период более одного года.

2. Анализ флуктуаций радиационного поля в 1988-2003 годах

2.1 Статистические методы обработки временных рядов

Временными рядами называют ряды измерений, зависящие от дискретного или непрерывного аргумента (времени), подвергающиеся случайным воздействиям или флуктуациям и допускающие только статистическое описание. Наблюдаемые явления, с одной стороны, имеют элемент случайности, а с другой – изменяются во времени.

Рассматриваемые в этой работе статистические подходы к анализу временных рядов достаточно универсальны и имеют широкую сферу применения, но мы будем рассматривать их с точки зрения полезности для экологической радиохимии. Нас будет интересовать изменение во времени показания детектора радиоактивного излучения, установленного в воздушной среде. Флуктуации природного фона и составят главный исследуемый нами ряд. Одновременно мы будем учитывать и роль флуктуаций метеорологических параметров при прогнозировании экологического риска.

Изменение радиационного фона управляется двумя явлениями: переносом радионуклидов в окружающей среде (эти флуктуации лимитируются гидрометеорологическими процессами) и вариациями космического излучения. Основной особенностью процессов, связанных с первым явлением, является их пространственно-временная изменчивость, обусловленная наложением и взаимодействием большого числа факторов. Характерными диапазонами изменчивости являются: межгодовая изменчивость (цикличность колебаний больше года), годовой ход, синоптическая изменчивость (временной масштаб колебаний от суток до нескольких суток), суточный ход,

мелкомасштабные флуктуации. Многофакторность, разномасштабность, полицикличность, большая изменчивость природных процессов приводят к необходимости рассматривать их как случайные функции временных и пространственных координат и описывать их свойства в терминах вероятностных характеристик. Далее под вероятностной моделью понимается конкретный вид записи случайного процесса, позволяющий получить сведения о любых его вероятностных характеристиках и в то же время учесть зависимость процесса от факторов, включенных в комплекс условий. Эти модели необходимы для обобщения результатов анализа, сжатия информации, установления связи между различными вероятностными характеристиками и воспроизведения реализаций в ненаблюдаемых ситуациях.

Математическая модель в виде случайной функции определяет допустимые операции над исходными реализациями, позволяет проводить анализ натуральных данных и интерпретировать полученные результаты в терминах вероятностных характеристик. Здесь важны стационарные (ССП) и периодически коррелированные случайные процессы (ПКСП). В качестве базовой модели стационарных процессов будем использовать процессы авторегрессии скользящего среднего (АРСС). Процессы АРСС позволяют по заданной корреляционной функции и одномерной функции распределения воспроизвести многие важные в теоретическом отношении и необходимые при решении практических задач свойства временных рядов.

Статистический анализ будем проводить с учетом конкретных алгоритмов одной из современных программ, существенно облегчающих расчеты. Речь идет об интегрированной системе для комплексного статистического анализа и обработки данных STATISTICA (фирма-производитель StatSoft Inc., USA) [24].

2.2 Стандартные методы обработки совокупности чисел.

Сначала мы не будем рассматривать интересующую нас совокупность данных в виде временного ряда, а будем обрабатывать ее как экспериментальную выборку, т.е. как простой набор чисел. Функцию распределения чисел оценим по эмпирической функции распределения. Для оценки плотности функции распределения строим гистограмму распределения каждой выборки. Для наглядности на гистограммы наложим плотность нормального распределения. Для грубой оценки разброса данных строим диаграммы рассеяния (Box-Whisker Plot). Дополнительную проверку нормальности распределения осуществляем путем перестроения гистограммы на вероятностной бумаге. Согласие данных с нормальным законом контролируем по χ^2 -критерию [25,26].

Для оценки типа распределения фона рассчитываем его параметры (выборочное среднее, т.е. первый начальный момент, m_1 , математическое ожидание, второй центральный момент, μ_2 (дисперсия), третий центральный момент (асимметрия), четвертый центральный момент, (эксцесс, т.е. степень кривизны в моде), а также два основных момента: асимметрия, и эксцесс, нормированные на дисперсию (γ_1 и γ_2).

Начальный момент k -го порядка вычисляем по формуле:

$$m_k = \sum_{i=1}^n N_i^k P_i,$$

где $k = 1, 2, \dots$ – порядок момента, n – число измерений, N_i – зарегистрированное число импульсов, P_i – вероятность набора импульсов N_i . Обычно рассчитывают четыре начальных момента, из которых название имеет только первый – математическое ожидание (среднеарифметическое) $m = \bar{x}$.

Центральный момент k -го порядка для дискретной случайной величины определяется формулой:

$$\mu_k = \sum_{i=1}^n (N_i - m)^k P_i.$$

Если начало координат выборки перенести в точку, соответствующую среднему (точнее – в математическое ожидание) и снова рассчитать моменты, то получим величины центральных моментов (четыре начальных момента переходят в три центральных момента: дисперсию, асимметрию и эксцесс) [25,26].

В отличие от начальных моментов, центральные моменты не меняются при прибавлении к случайной величине постоянного слагаемого, т.е. они не зависят от выбора начала отсчета в шкале измерения случайной величины. Но от выбранной единицы измерения зависимость остается: если, скажем случайную величину измерять ни в днях, а в часах, то значения центральных моментов также изменятся. Иногда это бывает неудобно. В таких случаях, чтобы устранить подобное влияние, моменты тем или иным способом нормируют, например, деля их на соответствующую степень среднего квадратичного отклонения. В результате получается безразмерная величина, не зависящая от выбора начала отсчета и единиц измерения исходной случайной величины.

Нормированные на дисперсию центральные моменты (их всего два) называются основными моментами [26].

Коэффициент асимметрии (нормированная на дисперсию асимметрия) – *Skewness* – первый основной момент распределения:

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sqrt{\mu_2^3}}.$$

Коэффициент эксцесса (крутизна в моде) – второй основной момент распределения – *Kurtosis*:

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3.$$

Здесь γ_1 и γ_2 подобраны таким образом, чтобы было удобнее сравнивать форму экспериментального распределения с нормальным (гауссовым) распределением (напомним, что для гауссова распределения $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$).

Программа STATISTICA рассчитывает основные моменты по формулам:

$$Skewness = \frac{nM_3}{(n-1)(n-2)(n-3)\sigma^3} = \frac{n \sum (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2) \left(\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}}$$

$$Kurtosis = \frac{n(n+1)M_4 - 3M_2^2(n-1)}{(n-1)(n-2)(n-3)\sigma^4} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n^2}} \cdot \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} - \frac{3n^2}{(n-2)(n-3)},$$

где $\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}$; $M_i = \sum (x_i - \bar{x})^i$, x_i – i -е измерение, $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ – среднее

арифметическое из всех результатов измерения, n – общее число измерений [24].

При больших n , эти формулы переходят в приведенные выше.

Принято считать, что асимметрия характеризует несимметричность распределения случайной величины, а эксцесс – степень выраженности «хвостов» распределения, т.е. частоту появления удаленных от среднего значений. Иногда значения асимметрии и эксцесса используют для проверки гипотезы о том, что наблюдаемые данные (выборка) принадлежат заданному семейству распределений, например, нормальному.

Параметры распределения γ_1 и γ_2 использовали для проверки гипотезы о типе распределения вероятности. Известно, что для нормального распределения $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$, для равномерного распределения $\gamma_1 = 0$, $\gamma_2 = -1,2$, для экспоненциального распределения $\gamma_1 = 1,53$, $\gamma_2 = 1,384$, для U -образного распределения, порождаемого синусоидой, $\gamma_1 = 0,0$, $\gamma_2 = -1,5$ и т.п. [27].

Гипотезы о подчинении выборки какому-либо известному статистическому распределению (нормальному, Пуассону и др.) проверяли по стандартным статистическим критериям. При использовании критерия согласия Колмогорова-Смирнова строили величину:

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|,$$

где \sup означает точную верхнюю границу, показывающую, насколько эмпирическая функция (например, изменения радиационного фона) отклоняется от выбранной нами теоретической функции. Величина D_n измеряет степень согласия F с F_n (при полном согласии эксперимента с теорией D_n равна нулю). Обычно проверку гипотезы строят при выбранном уровне значимости α [26]. Программа автоматически рассчитывает теоретическое значение $D(\alpha)$ и сравнивает его с экспериментальным D_n . Если $D_n > D(\alpha)$, то гипотеза о подчинении экспериментальной выборки заданному распределению отвергается при заданном уровне значимости (например, 95%). STATISTICA выдает параметры d и p [24]. Если $d > p$, то гипотеза отвергается, в обратном случае – принимается. При этом следует обращать внимание и на абсолютное значение величины p : чем оно ближе к 1, тем охотнее следует принимать гипотезу.

Критерий согласия Пирсона (или χ^2 -критерий) рассчитывается по формуле:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\omega_i - \omega_i^*)^2}{\omega_i^*}, \text{ где } \omega_i \text{ - частота появления значения } X_i, \omega_i^* \text{ - теоретическая}$$

частота

$$f = n - 1 - g, \text{ } g \text{ - число связей [27].}$$

Естественно, что радиационный фон флуктуирует относительно некоторого среднего значения. Но чрезвычайно важно, что само среднее – медленно изменяется во времени (такое явление называется трендом). Поэтому при анализе подобных массивов в первую очередь сглаживают результаты и находят тренд. Затем из исходных данных вычитают тренд, а остаток (шум) статистически анализируют с целью определения степени его упорядоченности.

В STATISTICA – используется экспоненциальное сглаживание и прогнозирование, позволяющее сгладить наблюдаемый ряд, выделить из него шум и спрогнозировать будущие значения. Используются модели, позволяющие учитывать различные виды трендов и сезонность, а также модели с аддитивным и мультипликативным шумом [24].

Простейшими моделями тренда являются:

- линейная модель $tr_t = b_0 + b_1 t$;

- полиномиальная $tr_t = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_n t^n$, где значение степени полинома n в практических задачах редко превышает 5;

- логарифмическая $tr_t = \exp(b_0 + b_1 t)$. Эта модель чаще всего применяется для данных, имеющих тенденцию сохранять постоянные темпы прироста;

- логистическая $tr_t = \frac{a}{1 + b e^{-ct}}$;

- Гомперца $\log(tr_t) = a - b r^t$, где $0 < r < 1$. Две последние модели задают кривые тренда S-образной формы. Они соответствуют процессам с постепенно возрастающими темпами роста в начальной стадии и постепенно затухающими темпами роста в конце.

- полигармоническая: любую гладкую периодическую функцию $G(t)$ с периодом p (т.е. функцию, для которой $G(t + kp) = G(t)$ для любого целого k) можно представить в виде ряда Фурье:

$$G(t) = \sum_{j=1}^p a_j \cos(j\omega t + \theta_j),$$

где $\omega = 2\pi / p$ называются основной частотой, a_j, θ_j - некоторые параметры. Частоты $j\omega$ называются гармониками основной частоты.

Временной ряд описывается полигармонической моделью, если он представлен в виде:

$$x_t = \sum_{j,k} a_{jk} \cos(j\omega_k t + \theta_{jk}) + \varepsilon_t,$$

где $\omega = 2\pi / p_k$, а ε_t является белым шумом.

Если периоды p_k не известны, для их определения используют методы спектрального анализа. Для оценки и удаления трендов из временных рядов чаще всего используется метод наименьших квадратов. Говоря языком регрессионного анализа, значения временного ряда x_t рассматривают как отклик (зависимую переменную), а время t – как фактор, влияющий на отклик (независимую переменную):

$$x_{t_i} = f(t_i, \theta) + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

где f – функция тренда (она обычно предполагается гладкой), θ – неизвестные нам параметры (параметры модели временного ряда), а ε_i – независимые и одинаково распределенные случайные величины, распределение которых мы предполагаем нормальным. Метод наименьших квадратов состоит в том, что мы выбираем функцию тренда так, чтобы

$$\sum_{j=1}^n [x_{t_i} - f(t_i, \theta)]^2 \rightarrow \min_{\theta}.$$

Для проверки адекватности модели анализируют дрейф остатков. Для описания остатков можно применять гауссовскую модель, согласно которой совокупность остатков можно рассматривать как выборку из некоторой нормальной совокупности (с нулевым средним) [28].

2.3 Первичная обработка флуктуаций γ -фона

График изменения интенсивности радиационного поля в г. Мариуполе в зависимости от времени приведен на Рис.8а. Показания счетчика ионизирующего излучения флуктуируют относительно среднего 13,58 мкР/час, изменяясь в интервале от 7,0 до 24,8 мкР/час, со стандартным отклонением 2,14. В первый период наблюдений фон уменьшался (распад радиоактивных аэрозолей после выброса в ходе чернойбыльской катастрофы), затем радиационный фон практически не менялся, но в последние годы имеет место некоторое его увеличение. Эти тенденции хорошо отражает дрейф базовой линии - (сплошная кривая на Рис.8а).

Полиномиальная модель тренда. Подгонка базовой линии к экспериментальным результатам была проведена методом наименьших квадратов по полиному четвертой степени [29]:

$$A = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3 + b_4 \cdot t^4,$$

где A – показания радиометра, t – время измерения (дни).

Были получены следующие значения параметров $b_0 = 15,6255$; $b_1 = 1,1520 \times 10^{-3}$; $b_2 = -1,6626 \times 10^{-6}$; $b_3 = 4,0193 \times 10^{-10}$ и $b_4 = -2,8054 \times 10^{-14}$. Не исключено, что если измерения фона будут продолжаться еще 30-50 лет, то тренд окажется гармоническим колебанием (синусоидой) с периодом примерно 10 лет.

На Рис.8б представлены значения радиационного фона, скорректированного на дрейф базовой линии ($I_{кор}$). Видно, что данные достаточно равномерно рассеиваются относительно нулевого среднего.

Функцию распределения фона оценивали по эмпирической функции распределения. С этой целью строили гистограмму распределения гамма-фона (разбиение на 36 классов) и дрейфа остатков (исходные данные минус тренд) (Рис.9а,б). Для грубой оценки разброса данных строили диаграммы рассеяния (Box-Whiskers Plot) (Рис.10а,б). Дополнительную проверку нормальности распределения осуществляли путем перестроения гистограммы на вероятностной бумаге (Рис.11а,б). Согласие данных с нормальным законом контролировали по критерию Пирсона. Визуальный анализ Рис.9-11 показывает, что распределение результатов измерения фона достаточно близко подходит к нормальному (Гауссову) распределению, но все же отличается от него. Плотность распределение измерений фона асимметрично, причем передний фронт пика круче заднего, но «хвост» пика оказался длиннее переднего фронта.

Таблица 18. Статистические параметры исходной совокупности измерений фона ($I_{фон}$) и совокупности чисел ($I_{кор}$), полученных путем вычитания из исходных данных дрейфа базовой линии (полином 4 порядка, рис.8,б)

Массив	Отклонение				γ_1	$\Delta\gamma_1$	γ_2	$\Delta\gamma_2$
	Минимальное	Максимальное	среднее	стандартное				
$I_{фон}$	7	24,75	13,575	2,143	0,068	0,032	0,415	0,064
$I_{кор}$	-5,609	10,198	-0,14	1,684	0,283	0,032	0,888	0,064

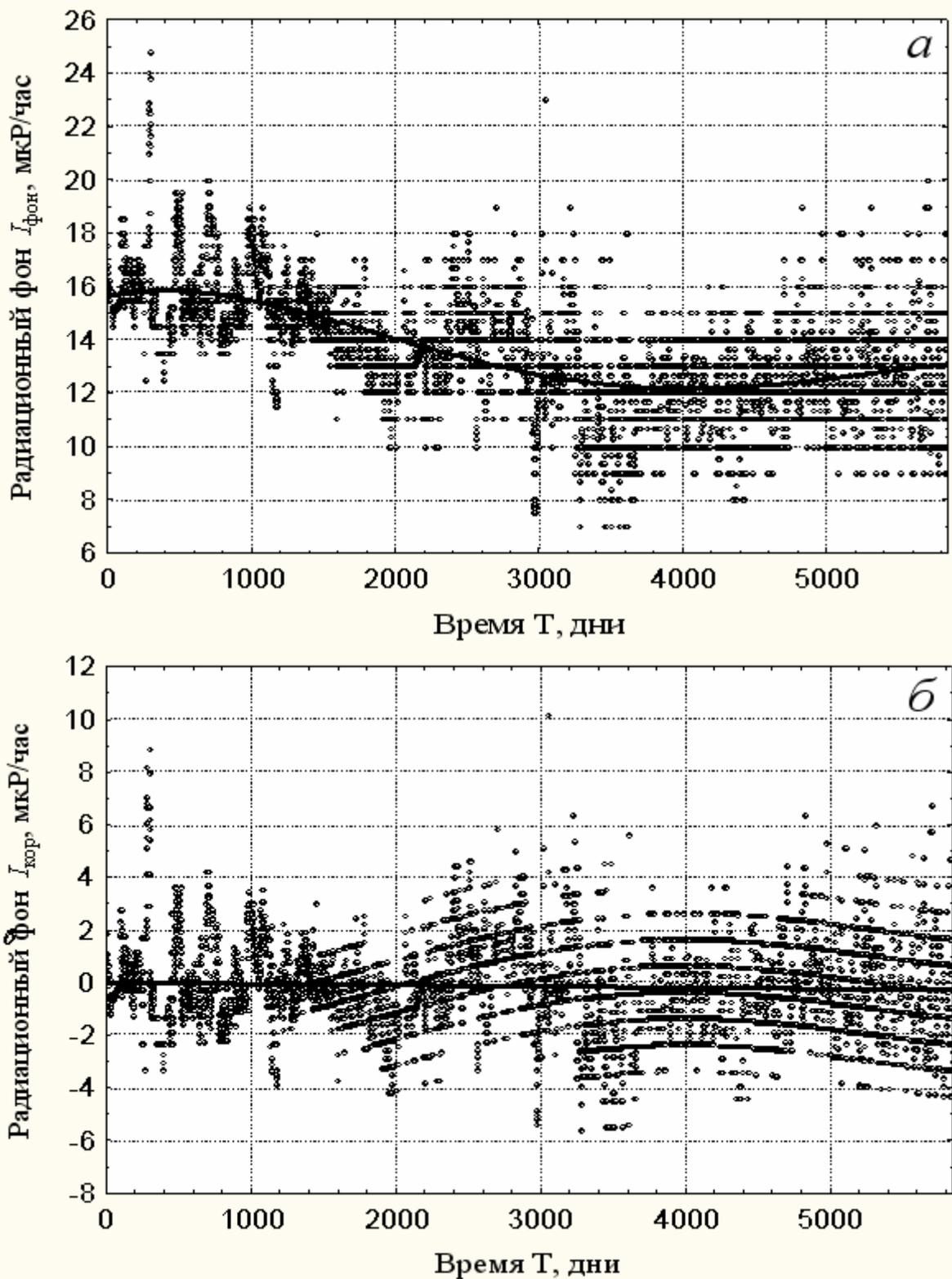


Рис.8 Изменения интенсивности радиационного поля в г. Мариуполе в 1988-2003 гг.: *a* – исходный массив данных (точки – измеренные величины, сплошная кривая – дрейф базовой линии фона (тренд) – полином четвертого порядка); *б* – данные по флуктуации радиационного фона, скорректированные на дрейф базовой линии ($I_{корр}$).

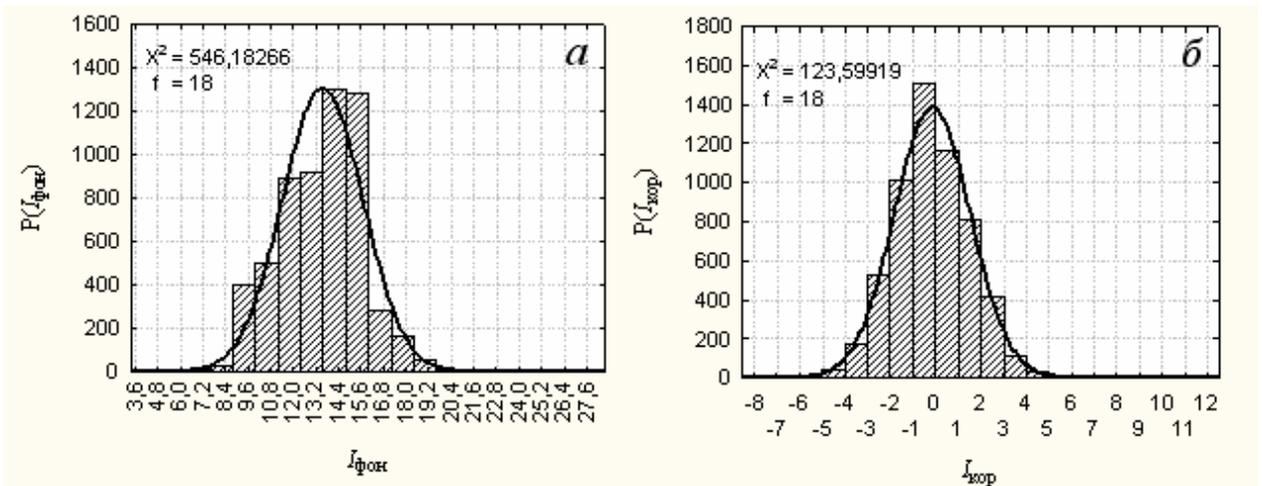


Рис.9 Гистограммы распределения гамма-фона (разбиение на 36 классов): *a* – исходный массив данных; *б* – спектр, скорректированный на дрейф базовой линии; — теоретическая подгоночная кривая, характеризующая нормальное (гауссовское) распределение (χ^2 -критерий согласия Пирсона, f -число степеней свободы).

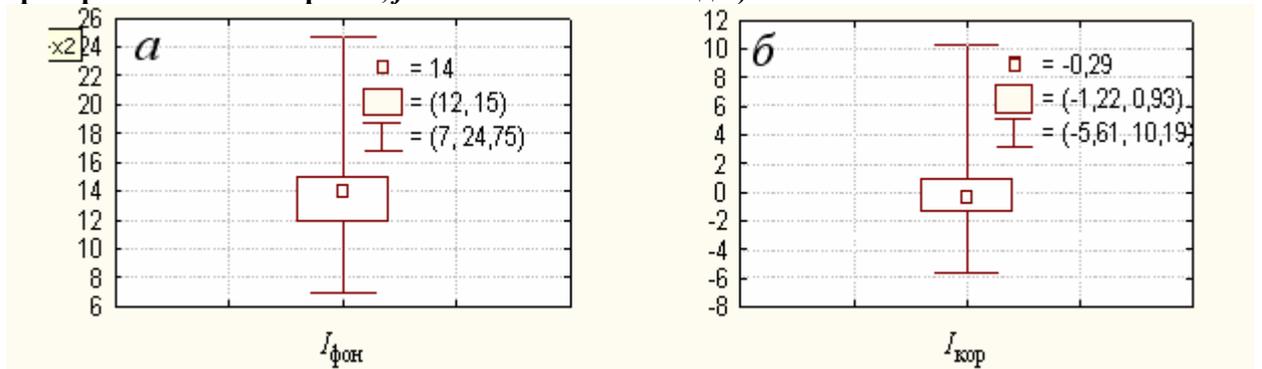


Рис.10 Диаграммы рассеяния (Box-Whiskers Plot): *a* - исходные данные, *б* – скорректированные на дрейф; \square - медиана, \square - диапазон (25%-75%), \perp - доверительный интервал (минимум-максимум)

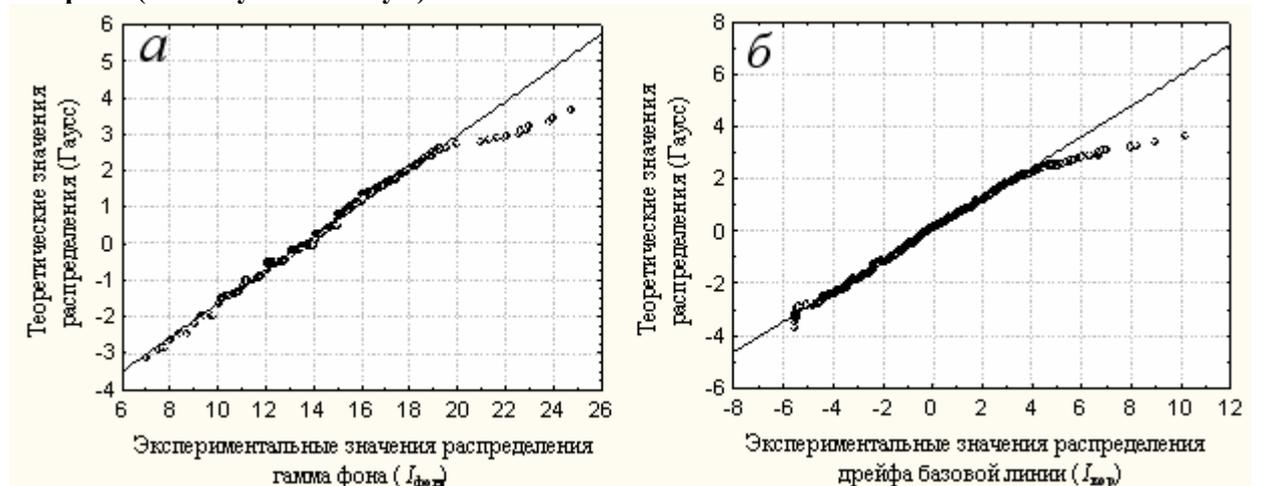


Рис.11 Гистограммы распределения гамма-фона, перестроенные в функциональном масштабе (вероятностная бумага): *a* - исходные данные, *б* – скорректированные на дрейф (точки – экспериментальные данные, прямая – соответствие ряда нормальному распределению).

Некоторые статистические параметры совокупности исходных результатов приведены в Табл.18. В результате расчетов были получены следующие значения: $\gamma_1 = 0,068$ и $\gamma_2 = 0,415$ (напомним, что теоретическое нормальное распределение характеризуется условием $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ [27]). С учетом приведенных в Табл.18 значений погрешностей измерения основных параметров можно заключить, что параметры γ_1 и γ_2 значимо отличаются от нуля, что не позволяет принять гипотезу о подчинении экспериментальных результатов нормальному распределению. Согласие данных с нормальным законом контролировали с помощью критерия Пирсона (χ^2 -критерия) и критерия согласия Колмогорова-Смирнова (К-С-критерия). Значение экспериментального критерия Пирсона $\chi^2_{\text{экс}}=546$ ($f=18$) существенно превышает теоретическое $\chi^2_{\text{экс}}(0,05;18)=28,87$ [30], что заставляет отказаться от гипотезы о подчинении рассматриваемой выборки нормальному распределению. Экспериментальное значение К-С-критерия составляет $d=0,093$. Для выполнения справедливости распределения Гаусса это значение превышает рассчитанное теоретическое значение $p=0,01$ (гипотеза принимается если $d < p$) [27].

Таким образом, основные статистические критерии позволяют отказаться от гипотезы о нормальности распределения результатов измерения радиационного фона в г. Мариуполе. Распределение близко к нормальному, но все же статистически значимо отличается от него.

Неподчинение выборки нормальному распределению в первую очередь связано с тем, что мы имеем дело не просто со статистическим разбросом результатов, а с совокупностью данных, изменяющихся во времени. Поэтому в дальнейшей работе исследовали статистический характер совокупности скорректированных результатов ($I_{\text{кор}}$). Коррекцию результатов проводили путем вычитания из экспериментальных данных значений тренда – полинома четвертой степени (Рис.8б). Для скорректированной выборки $\gamma_1 = 0,283$ и $\gamma_2 = 0,888$ (Табл.18), критерий Пирсона $\chi^2_{\text{экс}}=124$ ($f=18$), что существенно ниже, чем соответствующее значение для исходного фона, но все же выше теоретического значения. Экспериментальный критерий Колмогорова-Смирнова $d=0,04$ выше теоретического ($p=0,01$), но меньше чем для исходного фона.

Таким образом, несмотря на то, что коррекция фона на дрейф базовой линии несколько приблизила выборку к распределению Гаусса, статистические критерии не позволяют отнести скоррелированные данные к нормальному распределению.

Сглаживание экспериментальных данных. Другой способ анализа тренда основан на сглаживании исходных данных (например, путем сплайн - аппроксимации) [24]. Мы использовали экспоненциальное сглаживание. В этом случае ряд $x(t)$ сглаживается, образуя новый временной ряд $y(t)$, поведение которого можно прогнозировать. Простое экспоненциальное сглаживание описывается формулой:

$$y(t) = \alpha \cdot x(t) + (1 - \alpha)x(t - 1),$$

где α – некоторый фиксированный параметр, $0 < \alpha < 1$. Сглаживание начинают с некоторого значения (например $\alpha = 0,1$), а затем α повышают, добиваясь требуемой сглаженности результатов (чем меньше величина параметра α , тем сильнее сглаживание). В этом случае под дрейфом остатков будем понимать разность между исходными данными и результатом экспоненциального сглаживания при оптимальном α .

Пример сглаживания исходных результатов при $\alpha = 0,01$ приведен на Рис.12а. Видно, что сглаженная кривая продолжает флуктуировать, но становится заметным гармоническое колебание с периодом примерно в 3 года. Из рисунка также следует, что имеет место некоторый монотонный ниспадающий тренд. Удаление монотонного тренда проводили вычитанием из сглаженной кривой полинома 2-ой степени. Полученный результат приведен на Рис.12б. Видно, что основная составляющая найденного таким способом тренда – сумма гармонических колебаний (основные периоды: 390 и 1170 дней).

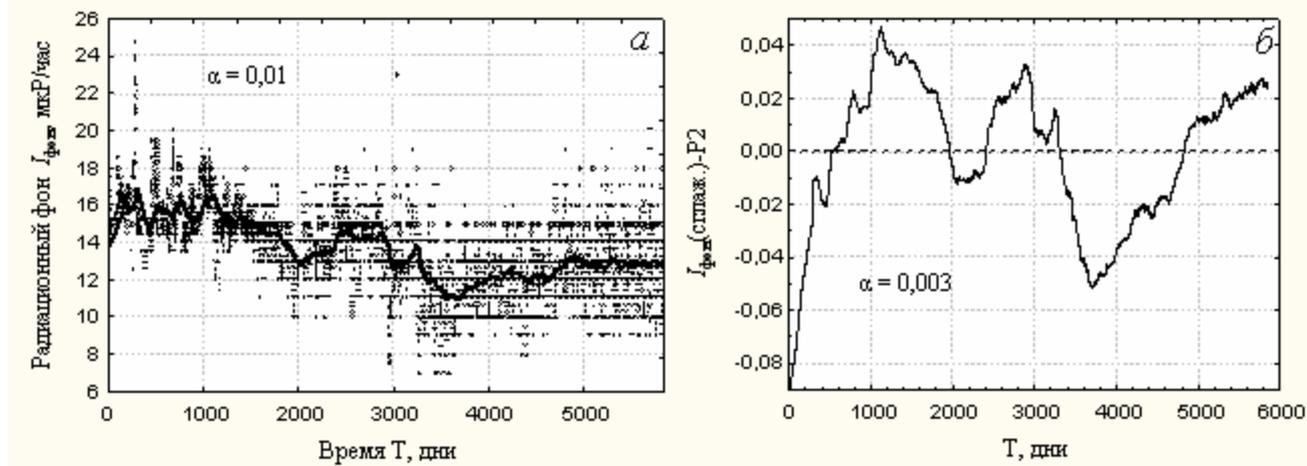


Рис.12 Определение тренда методом экспоненциального сглаживания и подгонкой полинома 2-й степени: а – экспоненциальное сглаживание при величине параметра $\alpha=0,01$; б – тренд измерений фона, полученный последовательным вычитанием полинома второго порядка и сглаживания при величине $\alpha=0,003$.

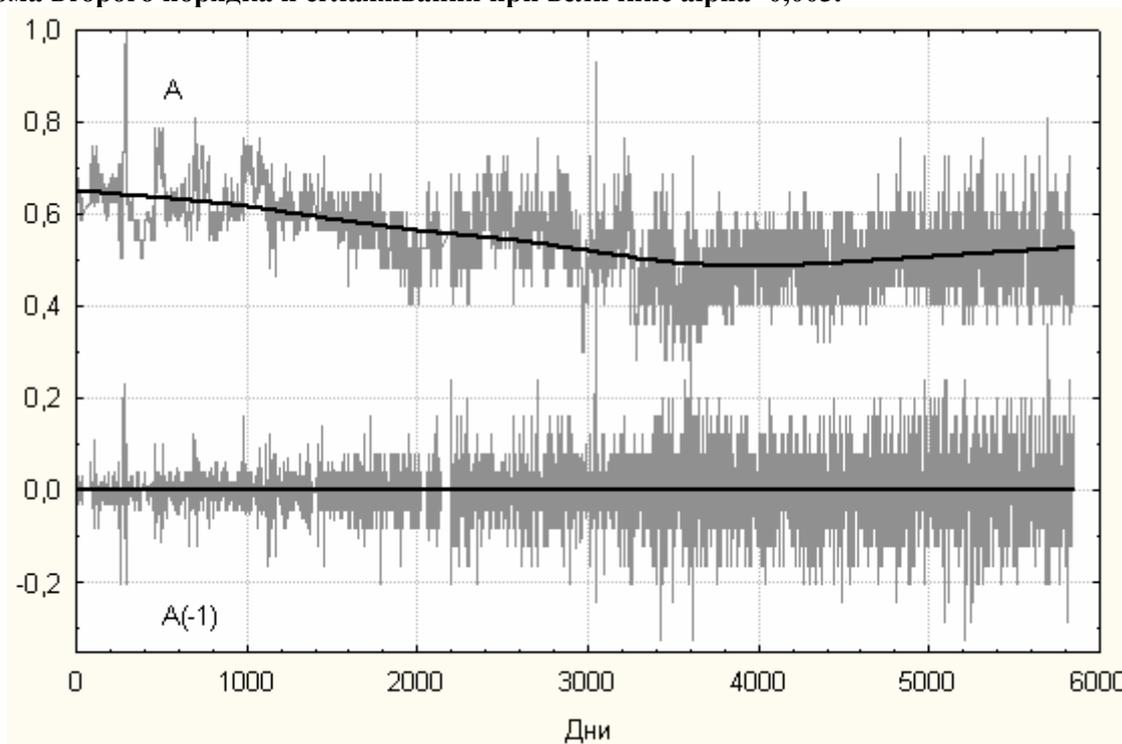


Рис.13 Исключение тренда методом однократного дифференцирования (lag 1).

Дифференцирование исходных данных. Данный метод используется не для определения тренда, а для исключения его из исследуемого массива данных. Он основан на том факте, что однократное дифференцирование превращает в константу прямую, двух кратное – полином второй степени, трех кратное – полином третьей степени и т.д. При этом на гармоническое колебание дифференцирование не влияет (первая производная от синуса – косинус, вторая – опять синус) [24].

Первым преобразованием служит дифференцирование ряда с *lag* 1. Смысл преобразования *Differencing* ($x = x - x(lag)$) при *lag* = 1 заключается в том, что из текущего значения ряда вычитается предыдущее (со сдвигом 1) и результат представляется в качестве значения нового ряда (при этом число членов ряда уменьшается на 1). Преобразование взятия разности первого порядка (т.е. дифференцирование ряда) позволяет избавиться от линейного тренда в ряде.

На Рис.13 в качестве примера приведен исходный ряд цифр (измерения фона) – верхний график и первая производная от исходного ряда. Видно, что уже первое дифференцирование с *lag* 1 удаляет из данных монотонный тренд.

2.4 Анализ флуктуаций фона как временного ряда.

Результаты измерений радиационного фона рассматривали как временной ряд, зависящий от непрерывного аргумента (времени), подвергающийся нерегулярным случайным воздействиям или флуктуациям, и допускающий только статистическое описание. Наблюдаемые явления, с одной стороны, имеют элемент случайности, а с другой - изменяются во времени. В задачи работы входило построение простой модели, описывающей ряд, сглаживание его, прогнозирование будущих значений временного ряда на основе наблюдаемых до данного момента эффектов, проведение спектрального анализа ряда. При этом учитывали монотонный тренд, а также сезонные и циклические составляющие ряда.

Известны следующие способы анализа временных рядов:

- Корреляционный анализ позволяет выявить существенные периодические зависимости и их лаги (задержки) внутри одного процесса (автокорреляция) или между несколькими процессами (кросскорреляция).

- Спектральный анализ позволяет находить периодические и квази-периодические составляющие временного ряда.

- Сглаживание и фильтрация предназначены для преобразования временных рядов с целью удаления из них высокочастотных или сезонных колебаний.

- Модели авторегрессии и скользящего среднего оказываются полезными для описания и прогнозирования процессов, проявляющих однородные колебания вокруг среднего значения

- Прогнозирование позволяет на основе выбранной модели поведения временного ряда предсказывать его значения в будущем [26,28]

Стандартный статистический анализ плохо применим к обработке реальных временных рядов. Известно, что для большинства временных рядов законы распределения довольно плохо приближаются наиболее известными аппроксимациями и законами распределения (нормальным, логнормальным, экспоненциальным и др.). Поэтому, когда мы имеем дело с временными рядами, систематизацию результатов анализа лучше проводить по моментным функциям первых двух порядков:

математическому ожиданию

$$m = \int_{(x)} x dF(x);$$

дисперсии

$$D = \int_{(x)} (x - m)^2 dF(x);$$

корреляционной функции

$$K(\tau) = \int_{\langle x_1 \rangle} \int_{\langle x_2 \rangle} (x_1 - m)(x_2 - m) dF(x_1, x_2, \tau),$$

и преобразованию Фурье корреляционной функции (спектральная плотность)

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} K(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau.$$

Для колебательных процессов спектральная плотность является одной из основных вероятностных характеристик, так как она характеризует частотное распределение амплитуд колебаний, позволяет выявить энергонесущие зоны и в дальнейшем интерпретировать их по возможному генезису.

Простейшими моделями являются случайные процессы, полное описание которых достигается заданием одномерной функции распределения $F(x)$. Примером такого процесса является белый шум, у которого значения реализаций в несовпадающие моменты времени независимы, корреляционная функция имеет вид:

$$K(\tau) = \begin{cases} D & \text{при } \tau = 0 \\ 0 & \text{при } \tau > 0 \end{cases};$$

а спектральная плотность постоянна во всем диапазоне частот.

Рассмотрим несколько примеров.

1) Корреляционные функции экспоненциально-косинусного типа:

$$K(\tau) = D \exp\{-\alpha |\tau|\} \cos(\beta \tau)$$

или

$$K(\tau) = \sum_{i=1}^n D_i \exp\{-\alpha_i |\tau|\} \cos(\beta_i \tau)$$

Для таких коррелограмм спектральные плотности являются дробно-рациональными функциями

$$S(\omega) = \frac{D\alpha}{2\pi} \sum_{k=1}^2 \left\{ \alpha^2 + [\beta + (-1)^k \omega]^2 \right\}^{-1}$$

или

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n D_i \alpha_i \sum_{k=1}^2 \left\{ \alpha^2 + [\beta + (-1)^k \omega]^2 \right\}^{-1}.$$

На практике довольно часто встречаются коррелограммы вида

$$K(\tau) = \sum_{i=1}^2 R_i \exp(-\alpha_i |\tau|) \cos(\beta_i \tau + \varphi_i).$$

2) Класс линейных стационарных случайных процессов с дробно-рациональной спектральной плотностью

$$S(\omega) = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{2\pi} \left| \frac{Q(i\omega)}{P(i\omega)} \right|^2,$$

где $Q(\omega)$ и $P(\omega)$ – полиномы степени q и p соответственно.

Процессы с такой спектральной плотностью получили название процессов авторегрессии-скользящего среднего.

3) Показательно-степенная функция

$$S(\omega) = A\omega^{-k} \exp(-B\omega^{-n}).$$

При $B=0$ получаем показательную функцию (распределение Вейбулла):

$$S(\omega) = A\omega^{-k} \quad \text{или} \quad \lg S(\omega) = A - k \lg \omega,$$

т.е. в двойном логарифмическом масштабе частотный спектр описывается прямой линией с тангенсом угла наклона k .

Методика получения оценок значений автокорреляционной функции r_k во многом напоминает оценку коэффициента корреляции для двух выборок. При больших выборках формула для расчета k -го члена автокорреляционной функции имеет вид:

$$\bar{r}_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}.$$

Точность приближения заметно снижается с ростом лага k из-за уменьшения числа наблюдений используемых для расчетов. При $k = 0$ \bar{r}_k по определению равно 1 и это значение обычно исключают из рассмотрения как не несущее никакой информации [28].

График выборочной автокорреляционной функции называют коррелограммой. На нем, кроме значений самой функции, обычно указывают доверительные пределы этой функции: границы приблизительного 95% интервала определяют как $-\frac{1}{n} \pm \frac{2}{\sqrt{n}}$. Отметим,

что для гауссовского белого шума, довольно часто можно наблюдать, что одна или две из оценок выходят за границы доверительной трубки (теоретически автокорреляционная функция r_k белого шума равна нулю для всех $k \neq 0$, т.е. значения должны были тонуть в доверительном интервале). Это обстоятельство затрудняет интерпретацию коррелограммы. Для ряда с сезонными колебаниями коррелограмма содержит периодические всплески, соответствующие периоду сезонных колебаний. Это позволяет устанавливать предполагаемый период сезонности.

Таким образом, при наличии тренда автокорреляционные функции с ростом лага либо просто экспоненциально затухают, либо представляют из себя экспоненциально затухающие синусоидальные волны.

Траектории многих стационарных случайных процессов выглядят гораздо более гладко, чем траектории белого шума. Это связано с наличием положительной корреляции между двумя или несколькими соседними членами подобных рядов. Если же корреляция между соседними членами ряда отрицательна, то траектории подобных процессов будут более изломанными, чем траектории белого шума.

Для того, чтобы по полученной реализации процесса подобрать модель авторегрессии, необходимо предварительно указать возможный порядок этой модели. Непосредственно из вида выборочной автокорреляционной функции этот вывод сделать достаточно трудно. Эту задачу значительно облегчает специально преобразованная автокорреляционная функция. Она называется частной автокорреляционной функцией. Для краткости используем сокращения: АКФ – автокорреляционная функция, ЧАКФ – частная автокорреляционная функция [28].

Автокорреляционная функция для массива радиационного фона, скоррелированного на тренд (полином 4-го порядка), $I_{кор}$, для числа лагов 999 приведена на Рис.14а. Видно, что автокорреляционная функция с ростом лага уменьшается по простой параболической зависимости. Такое поведение характерно для ситуаций, в которых событие существенно зависит от его предыстории. При больших значениях лага корреляционная функция начинает совершать колебания относительно оси абсцисс. Это указывает на присутствие в экспериментальных данных сезонных колебаний, описываемых синусоидами с различными периодами колебаний. Из Рис.14а также видно, что в экспериментальные данные существенный вклад вносит белый шум.

На Рис.14б приведены аналогичные данные для частной автокорреляционной функции (для 15 лагов). Видно, что для расчета временных флуктуаций в некоторой конкретный день необходимо знать значения фона по крайней мере за 8 предыдущих дней. Этот факт важен из-за самой возможности предсказаний: наличие некоторого порядка (законов изменения) в данных позволяет заглядывать в будущее.

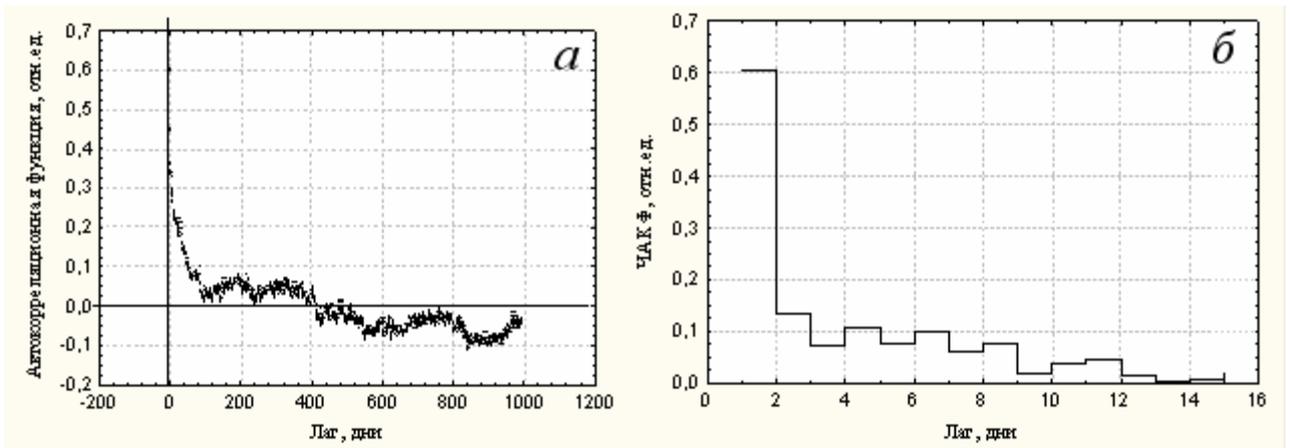


Рис.14 Автокорреляционная и частная автокорреляционная функции; *a* – автокорреляционная функция радиационного фона, скорректированного на тренд (полином 4-ой степени); *б* – частная автокорреляционная функция (для 15 лагов) радиационного фона, скорректированного на дрейф базовой линии.

Многие временные ряды удобно рассматривать не во временной области значений аргумента, а в частотной. Этот переход можно совершить с помощью периодограммы. Ее назначение – обнаружение периодических составляющих в рассматриваемом ряде [28].

Пусть x_t – временной ряд с нулевым средним, а t пробегает целые числа от 1 до n . Рассмотрим ковариацию ряда x_t с рядами $\cos(2\pi t/T)$ и $\sin(2\pi t/T)$, где T – некоторая фиксированная величина, обычно именуемая периодом, или длиной волны. Пусть далее:

$$A = \frac{2}{\pi} \sum_{t=1}^n x_t \cos \frac{2\pi t}{T}, \quad B = \frac{2}{\pi} \sum_{t=1}^n x_t \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

Введем величину $S^2(T)$:

$$S^2(T) = A^2(T) + B^2(T).$$

График зависимости $S^2(T)$ от длины волны называется периодограммой. По замыслу, функция $S^2(T)$ должна принимать большие значения (иметь локальные максимумы – пики) для тех значений T , которые являются периодами для имеющегося у ряда x_t периодических составляющих. Практически это далеко не так, и часть максимумов $S^2(T)$ к реальным периодам ряда x_t не имеют отношения. Вообще анализ периодограммы очень часто ведет к ложным выводам, поэтому к нему надо подходить с осторожностью [28].

Определение периодограммы часто использует понятие спектральной плотности. Спектральная плотность стационарного случайного процесса – преобразование Фурье ковариационной функции стационарного в широком смысле случайного процесса. Параметрическая спектральная оценка опирается на использовании модели смешанного процесса авторегрессии-скользящего среднего, т.е. на предположении о том, что спектральная плотность представляет собой отношение квадратов модулей двух тригонометрических многочленов фиксированных порядков.

Если коррелограмма выявила наличие сезонных колебаний целесообразно провести полный спектральный (Фурье) анализ временных рядов, и построить периодограмму.

Периодограмма дает оценку корреляционной функции. В общем случае периодограмма не является хорошей оценкой спектральной плотности. Поэтому для хорошей оценки периодограммы ее сглаживали с помощью некоторого спектрального окна (например, окна Барлетта) [24].

Поскольку коррелограмма выявила наличие сезонных колебаний, был проведен полный спектральный (Фурье) анализ временных рядов и построена периодограмма. Периодограммы массива исходных данных радиационного фона для разных масштабов приведены на Рис.15а,б. Характеристики основных линий спектра собраны в Табл.19.

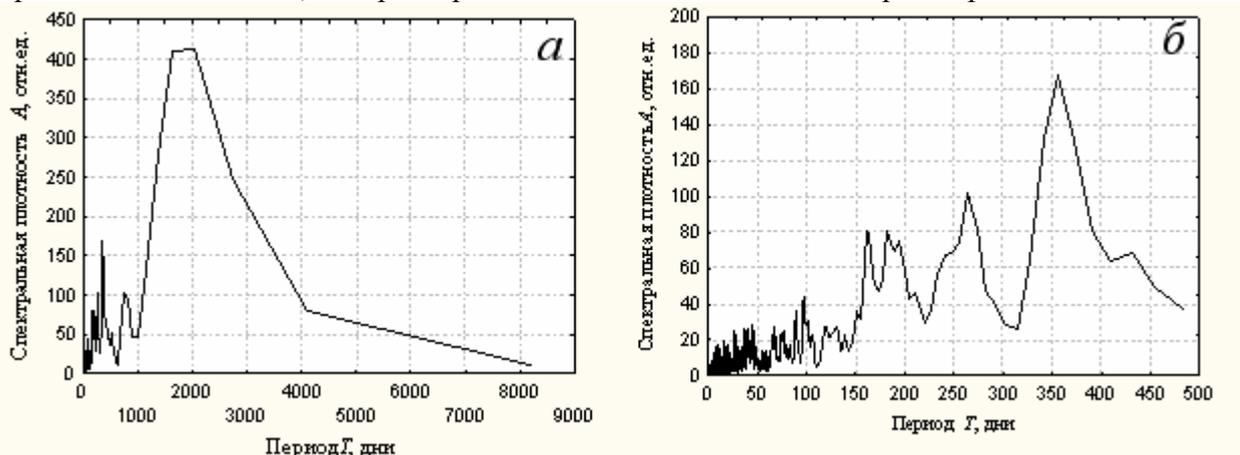


Рис.15 Периодограмма массива радиационного фона, скорректированного на дрейф базовой линии; а – весь спектр; б – участок спектра при высоких частотах.

Таблица 19. Основные линии в спектре Фурье радиационного фона, скорректированного на дрейф базовой линии.

Частота ω , день ⁻¹	Период T , день	Спектральная плотность, A
0,0006104	1638,4	409,1
0,0013428	744,7	103
0,0028076	356,2	168,1
0,0037842	264,3	101,7
0,0051270	195	75,12
0,0054932	182	80,21
0,0062256	160,6	80,17
0,0102539	97,52	44,39
0,0112305	89	36,18
0,0243327	41,42	26,8
0,0368652	27,13	25,29
0,0551758	18,21	18,07
0,0931396	10,74	16,98
0,1187744	8,42	16,51
0,1424561	7,02	16,21

Отметим, что в соответствии с теорией рядов Фурье линии с периодом более половины длины массива (т.е. более 2900 дн) физического смысла не имеют [28]. Спектр Фурье включает несколько гармонических колебаний с четко фиксированными периодами или группами периодов. Основными являются следующие периоды: 1638 дн (4,49 г.); 356дн (0,98 г.), (между ними есть период в 745дн (2,04 г.)); 264дн (8,7 мес); период 195дн (6,4 мес) и сопутствующие периоды в 182дн (5,98 мес) и 160дн (5,25 мес); 97дн (3,2 мес); 89дн (2,9 мес); 41дн и 27дн (около месяца); 18дн, 11дн (несколько недель); и 8,4дн, 7дн (примерно неделя) (Рис.16а,б)

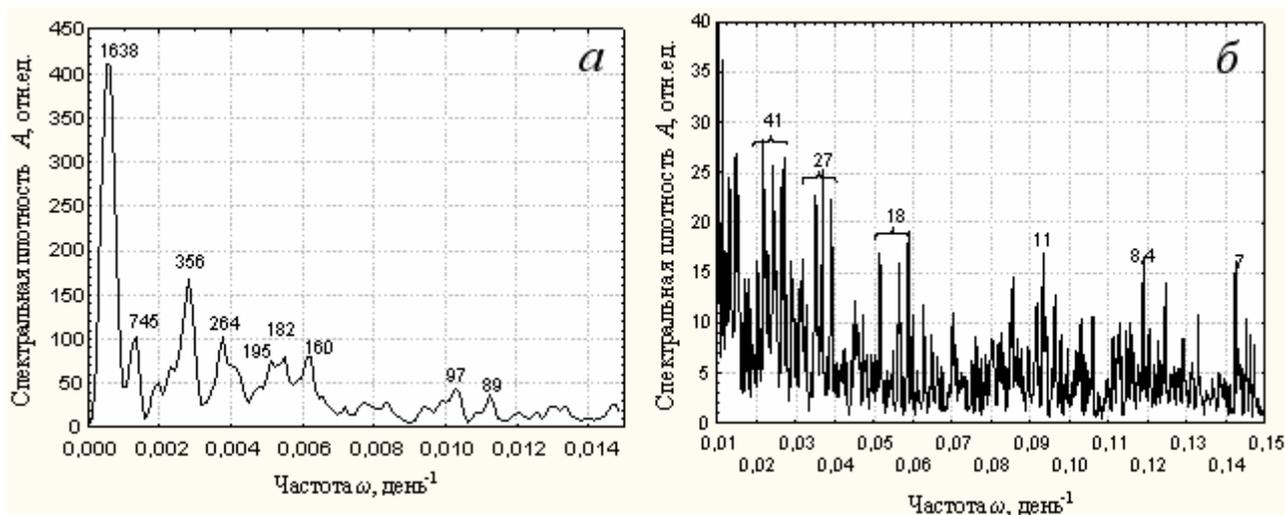


Рис. 16 Частотные характеристики спектра радиационного фона; *a* – при низких частотах; *б* – при высоких (цифрами указан период для пика в днях, фигурной скобкой – усреднение некоторых ансамблей пиков).

Стандартный алгоритм [31] предполагает построение спектров автокорреляторов и разностных моментов различных порядков для исходных и новых рядов, получаемых путем последовательного дифференцирования исходных. Простые выражения для указанных зависимостей позволяют получать количественную информацию о характере релаксации формирующихся нелинейных локальных возбуждений и позволяют прогнозировать эволюцию этих систем. При этом степенные спектральные закономерности определяются коррелированной последовательностью динамических всплесков измеряемых переменных, а разностные моменты различных порядков для исходных временных рядов определяются исключительно скачками измеряемых переменных в низкочастотном пределе.

Рассмотрим эволюцию, в которой нерегулярные флуктуации (резкие всплески и скачки) переменной $V(t)$ ведут себя непредсказуемым образом в каждой точке. Введем спектральную плотность $S(\omega)$ автокоррелятора $K(\tau) = \langle V(t)V(t+\tau) \rangle$ динамической переменной $V(t)$. Спектральная плотность определяется по соотношению Хинчина-Винера:

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} \cos(2\pi\omega\tau) K(\tau) d\tau.$$

При соответствующих условиях сходимости имеет место формула обращения (обратное преобразование Фурье):

$$K(\tau) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \cos(2\pi\omega\tau) S(\omega) d\omega.$$

Рассматриваются стационарные процессы: $K(\tau) = K(-\tau)$. Частота выражается через волновое число: $\omega = k / 2\pi$.

Введем «структурную функцию» порядка p для динамической переменной $V(t)$ (разностное или «моментное» распределение порядка p , $S_p(\tau)$, где величина τ (*lag*, см. ниже) характеризует временной интервал между двумя анализируемыми значениями $V(t)$):

$$S_p(\tau) = \langle |V(t) - V(t+\tau)|^p \rangle.$$

Как известно, функции $S(\omega)$ и $S_p(\tau)$ указывают на наличие корреляционных связей между предыдущими и последующими событиями.

Сразу перейдем к низкочастотному пределу $\omega \ll 1/(2\pi T_{0,\min})$, где T_0 – характерный интервал времени между смежными всплесками i -го пространственно-временного уровня.

Получим некоторые аппроксимации [32]:

1. Фликкер шум:

$$S(\omega) = 1/(\omega)^{1-\mu},$$

где $0 < \mu < 1$. График спектральной плотности в двойном логарифмическом масштабе – прямая линия, тангенс угла наклона (показатель фрактала, $\mu = D$) указывает на наличие некоторого порядка в детерминированном хаосе (в хаосе (белом шуме) – прямая, параллельна оси абсцисс), т.е. корреляцию бесконечной длины.

2. Леви-аппроксимация – в общем виде интегралы не берутся, но в двух случаях возможны аналитические решения:

а) $s = 0$ решение выражается через интегралы Френеля, малоприспособные для рутинных вычислений,

б) $s = 1$:

$$S(\omega) = \frac{g}{\pi^2} \frac{\lambda_0 K_0}{\left[\omega^2 + \left(\frac{\lambda_0 K_0}{2\pi} \right)^2 \right]}$$

При малых частотах спектральная плотность не зависит от частоты (потеря памяти в корреляционной связи), а затем уменьшается по закону ω^{-n} , где $1 < n < 3$.

3. Модифицированная Леви-аппроксимация $n > 3$.

Частотный спектр сначала не зависит от частоты, а затем круто убывает с ростом частоты:

$$S(\omega) = \frac{g_0 (\lambda_0 K_0)^a}{\omega^n + \left(\frac{\lambda_0 K_0}{2\pi} \right)^n}.$$

Напомним, что $n = 2$ соответствует Фиковской диффузии, $1 < n < 3$ – Леви-диффузии, $n = 5/3$ – случай Колмогорова (полностью развитая турбулентность), $n = 4$ – турбулентная диффузия.

Попытаемся навести мостик между физикой и математической статистикой, т.е. сопоставим рассматриваемые здесь случаи самоподобия и известные статистические распределения.

4. Аппроксимация Леви с $s = 1$

$$S(\omega) = \frac{g}{\pi^2} \frac{\lambda_0 K_0}{\left[\omega^2 + \left(\frac{\lambda_0 K_0}{2\pi} \right)^2 \right]}$$

может быть представлена в виде:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{b_0}{\omega^2 + a_0},$$

т.е. с точки зрения статистики представляет собой процесс авторегрессии, AR(1).

При $a_0 \ll \omega$ получаем Фликкер-шум, где $1 - \mu = -2$ или $\mu = 3$.

Модифицированная Леви-аппроксимация $n > 3$

$$S(\omega) = \frac{g_0 (\lambda_0 K_0)^a}{\omega^n + \left(\frac{\lambda_0 K_0}{2\pi} \right)^n}$$

при $n = 4$ из математической статистики найдем подходящий случай:

$$S(\omega) = \frac{b_0}{\omega^4 + a_0},$$

т.е. данный вариант аппроксимации представляет собой процесс авторегрессии 2-го порядка [28].

В последнее время для выявления степени упорядоченности массива временных данных стали использовать идеи геометрии фракталов, ранее предложенные для характеристики пространственных объектов. Анализ детерминированного хаоса (выявление наличия редких, но повторяющихся событий) проводят путем перестройки графика Фурье в двойном логарифмическом масштабе [32,33].

На Рис.17 спектр Фурье для $I_{кор}$ представлен в двойном логарифмическом масштабе, $\ln A - \ln(\omega)$. Видно, что спектр хорошо аппроксимируется прямой линией, т.е. является типичным Фликкер шумом:

$$\ln A = \ln A_0 - k \cdot \ln \omega,$$

где $\ln A_0 = -0,6613$, $k = 0,7797$, ω - частота [дн⁻¹].

Тангенс угла наклона кривой дает меру упорядочения статистического массива. В нашем случае k существенно отличается от нуля (т.е. от значения, характерного для «белого шума» - совершенно неупорядоченного массива, «идеального» хаоса) и довольно близок к единице. Эту меру можно рассматривать как показатель фрактала, т.е. использовать как меру детерминированного хаоса.

В рамках геометрии фракталов[34] параметр k связан с фрактальной размерностью: $k = 2 \times (3 - D)$ или $D = 3 - 0,5k$, где $D > 1$ - фрактальная размерность.

(Напомним, что для полностью упорядоченного (детерминированного) процесса, развивающегося в трехмерном пространстве показатель фрактала равен 3). В нашем случае $k = 0,78$, фрактальная размерность D для радиационного фона, скоррелированного на дрейф базовой линии, составляет 2,61. Очевидно, что, несмотря на кажущийся случайный характер колебания радиационного фона в районе г. Мариуполя, в нем имеется достаточно хорошо упорядоченные (повторяющиеся) элементы.

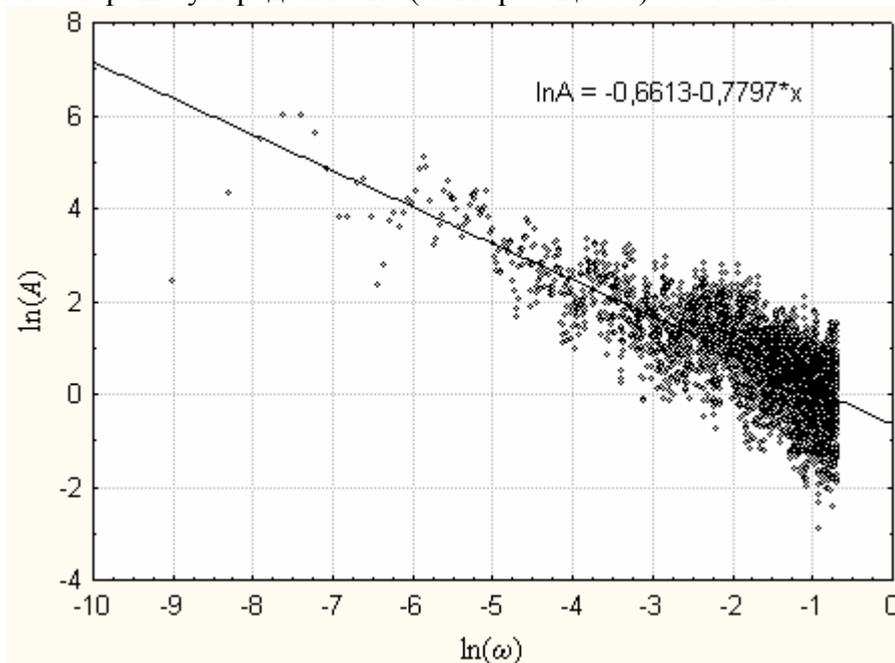


Рис.17 Спектр Фурье радиационного фона, скорректированного на дрейф базовой линии (полином 4-ой степени), построенный в двойном логарифмическом масштабе (точки – экспериментальные данные, сплошная линия – подгонка прямой к экспериментальному массиву).

3. Анализ флуктуаций радиационного поля по годам (в период 1988-2003 гг.)

До сих пор мы рассматривали последовательность 16-ти летнего измерения интенсивности радиационного фона в попытке найти основные зависимости в долговременном плане. Рассмотрим теперь характер эволюции фона каждого года.

На Рис.18а приведены данные по изменению фона в течении года (по всем 16 годам), на Рис.18б те же данные представлены в виде двумерного графика. Заметна отмеченная выше тенденция падения общей интенсивности фона в первые годы измерений. Существуют и некоторые сезонные колебания: весной и летом фон, как правило, выше, чем зимой и осенью.

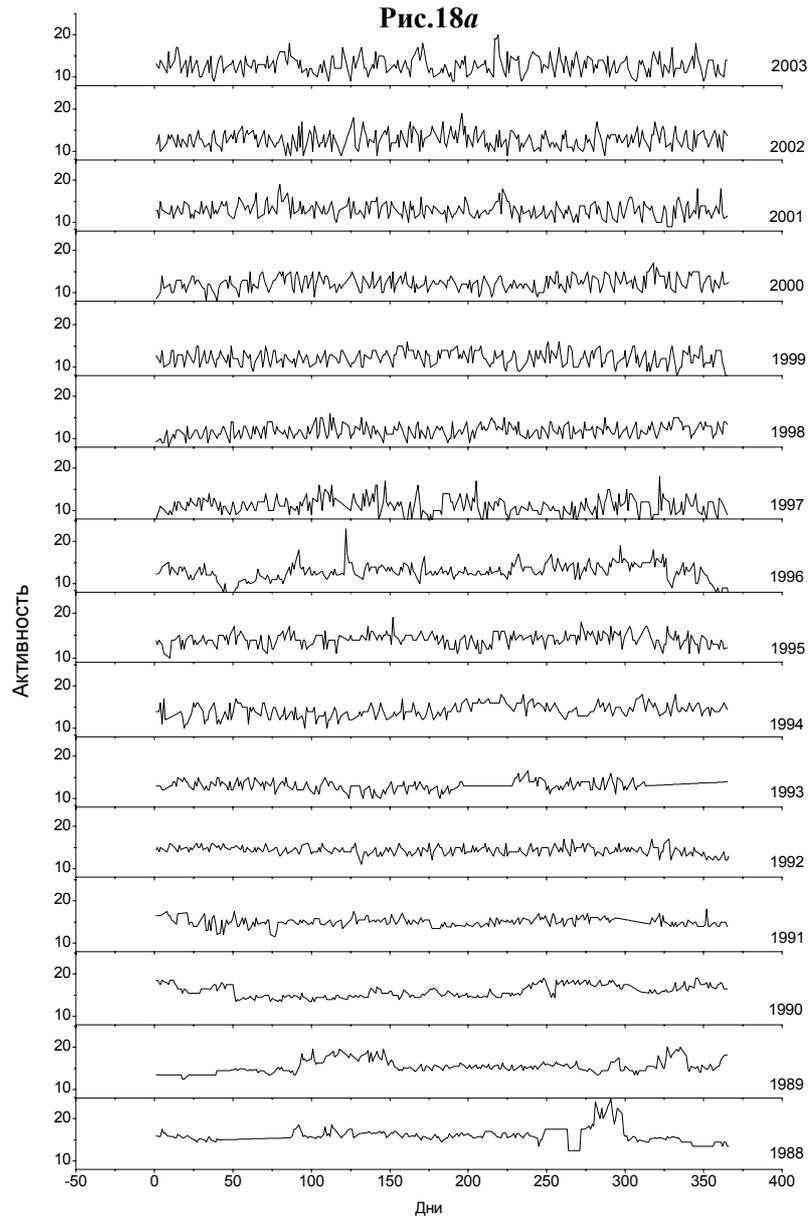


Рис.18б

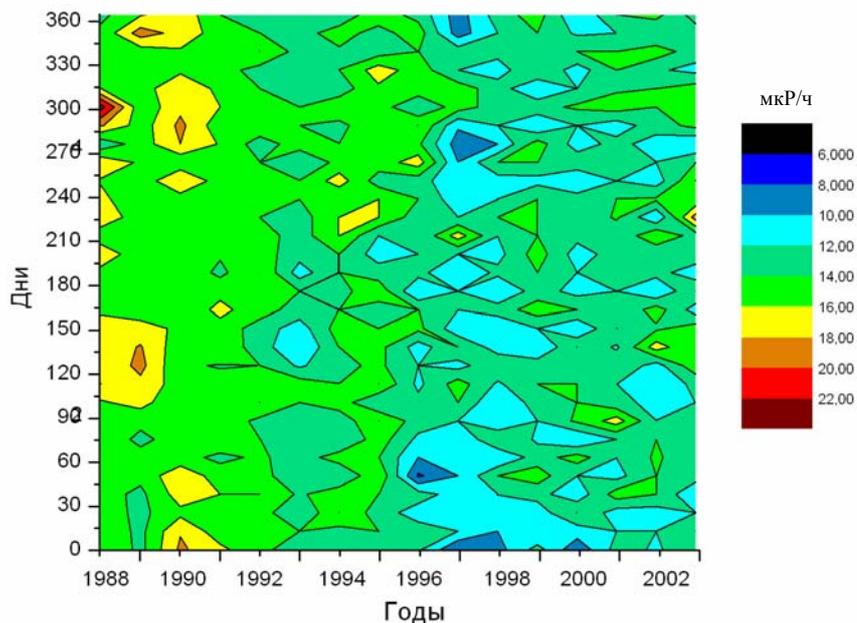


Рис.18 Изменение интенсивности гамма-фона в течение года в период 1988-2003 гг.

а) Флуктуации фона в разные годы.

б) Интенсивности фона, построенные на двумерном графике.

Для выявления годового тренда, проводили усреднение данных по годам. Для наглядной демонстрации роли климатического периода (зима-весна-лето-осень) данные строили, начиная с 1-го декабря и кончая 30-м ноября. На Рис.19 представлены модифицированные таким образом исходные данные и усредненное по годам значение фона. Видно, что усреднение значительно сглаживает данные, которые, однако, по-прежнему достаточно сильно флуктуируют.

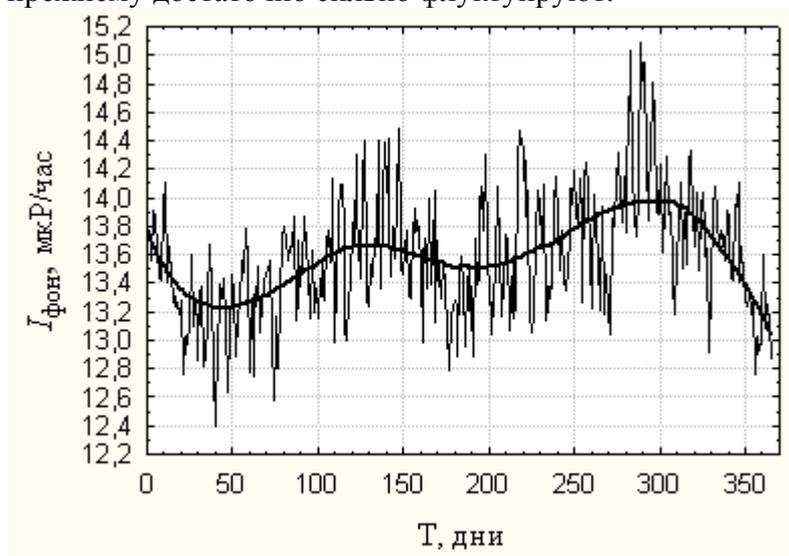


Рис.19 Флуктуации фона в течение 16 лет и усредненные по годам данные (толстая кривая)

Поскольку на усредненных данных наблюдается незначительный монотонный дрейф и заметный гармонический, то модель тренда строили как совокупность линейной и полигармонической модели [35]. Для моделирования временного ряда мы использовали аддитивную схему представления ряда в виде:

$$y(t) = f_0(t) + f_p(t) + \zeta(t),$$

где $y(t)$ – исходный ряд, f_0 – тренд, f_p – периодическая составляющая и $\zeta(t)$ – белый шум. Тренд выделяли в виде многочлена, используя линейный метод наименьших квадратов для нахождения коэффициентов. Для выделения периодической составляющей f_p проводили «полигармоническое отбеливание». При этом функция f_p представлялась в виде тригонометрического полинома:

$$f_p(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(2\pi\nu_n t) + b_n \sin(2\pi\nu_n t)]$$

В процессе расчетов для каждого значения частоты ν находили коэффициенты a_0 , a_i , b_i , $1 < i < N$, используя линейный метод наименьших квадратов. Оптимальное значение ν получали при решении одномерной задачи линеаризации. В обоих случаях минимизировалась одна и та же целевая функция:

$$F = \sum_{i=1}^L [y(t_i) - f_0(t_i) - f_p(t_i)]^2,$$

где $y(t_i)$, $1 < i < L$ – экспериментальные точки. Число гармоник N определяли с помощью оценки остаточной дисперсии. Проводили также анализ ряда остатков для установления его близости белому шуму.

Расчеты проводили с использованием пакета программ ORIGIN. С этой целью к исходным данным подгоняли приведенную ниже функцию (прямая + 3 набора гармоник):

$$F = P_1 \cos(2\pi P_2 P_4 x) + P_3 \sin(2\pi P_2 P_4 x) + P_5 \cos(2\pi P_2 P_7 x) + P_6 \sin(2\pi P_2 P_7 x) + P_8 \cos(2\pi P_2 P_{10} x) + P_9 \sin(2\pi P_2 P_{10} x) + P_{11} \cos(2\pi P_2 P_{13} x) + P_{12} \sin(2\pi P_2 P_{13} x) + P_{14} \cos(2\pi P_2 P_{16} x) + P_{15} \sin(2\pi P_2 P_{16} x) + P_{17} \cos(2\pi P_2 P_{19} x) + P_{18} \sin(2\pi P_2 P_{19} x) + P_{20} \cos(2\pi P_2 P_{22} x) + P_{21} \sin(2\pi P_2 P_{22} x)$$

Расчитанные коэффициенты подгоночной кривой равны:

$$\begin{aligned} P_1 &= -14,10362; & P_2 &= 0,00835; & P_3 &= 9,93931; & P_4 &= 0,7515; & P_5 &= 29,93545; \\ P_6 &= -14,75775; & P_7 &= 0,76924; & P_8 &= -15,42826; & P_9 &= 4,49088; & P_{10} &= 0,78813; \\ P_{11} &= 0,10202; & P_{12} &= -0,07677; & P_{13} &= 1,61243; & P_{14} &= 0,08454; & P_{15} &= 0,03664; \\ P_{16} &= 2,90113; & P_{17} &= 0,05447; & P_{18} &= -0,08436; & P_{19} &= 4,14544; & P_{20} &= -0,04738; \\ P_{21} &= 0,00835; & P_{22} &= 5,03725. \end{aligned}$$

Усредненные по годам измерения фона и тренд, рассчитанный по рассматриваемому методу, представлены на Рис.20а. Видно, что подобранного числа гармоник достаточно для описания хода полигармонического тренда. Этот вывод подтверждает и статистический анализ дрейфа остатков. Гистограмма дрейфа остатков достаточно хорошо описывается нормальным распределением.

Обращает на себя внимание, что три найденных параметра (частоты) $P_4 = 0,7515$, $P_7 = 0,76924$ и $P_{10} = 0,78813$ практически равны друг другу. Поэтому их можно заменить одной, средней, частотой. Более того, другие частоты, выражаемые параметрами $P_{13} = 1,61243$, $P_{16} = 2,90113$, $P_{19} = 4,14544$ и $P_{22} = 5,03725$ в первом приближении оказываются кратными этой величине. Сделанный вывод подтверждает и формальное разложение в ряд Фурье подгоночной функции $F(t)$. Как следует из периодограммы (Рис.20б), трендом управляют синусоиды двух периодов: 21 и 28 дней (и кратные им периоды (42, 84 дня и т. п.). Поэтому можно предположить, в качестве первого

приближения, что тренд управляется колебаниями с периодом около месяца и периодом около трех месяцев.

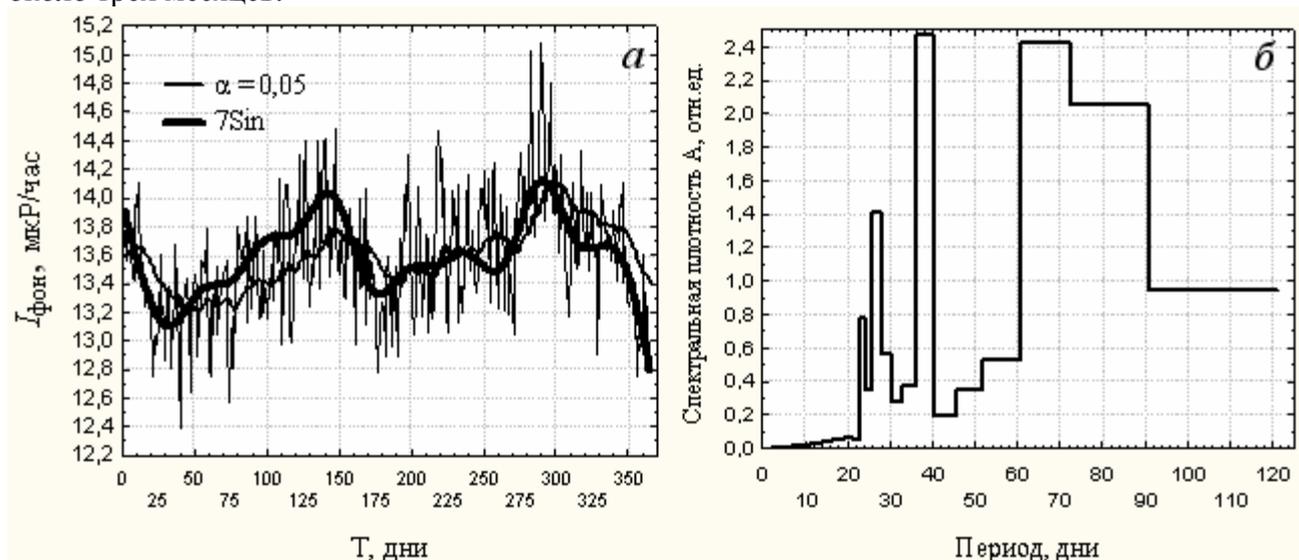


Рис.20а – подгонка к усредненным по 16 годам измерениям фона тренда, представляющего собой комбинацию линейной и полигармонической моделей (для сравнения дана кривая экспоненциального сглаживания усредненных результатов при величине $\alpha=0,05$); б – периодограмма модели тренда Рис.20а.

Из Рис.20а хорошо видно, что зимой и летом (спокойная атмосфера) интенсивность радиационного поля относительно низка, тогда как весной и осенью (сильные ветра, поднимающие песчаные бури) интенсивность фона довольно высока. Поэтому весной и осенью население получает относительно высокие дозы облучения, что может приводить в этих сезонах к повышенной заболеваемости. Подобные сезонные колебания фона указывают на особую роль монацитовых песков, поднимаемых весной и осенью в воздух, и приносимых в город Мариуполь.

Кросскорреляции.

В рамках исследования возможного взаимовлияния между различными временными рядами а также для выявления существенных периодических зависимостей и их лагов (задержек), между несколькими процессами проводят кросскорреляционный анализ [24].

Кросскорреляционный коэффициент $r_{xy}(k)$ представляет собой корреляцию между двумя рядами X и Y , где X отстает на k наблюдений (лаг).

Кросскорреляционный коэффициент рассчитывается программой *STATISTICA* по формуле:

$$r_{xy}(k) = c_{xy}(k) / s_x s_y \quad \text{для } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

где c_{xy} - кроссквариационный коэффициент для лага k ;

$$s_x - \text{среднеквадратичное отклонение ряда } X = \sqrt{(1/n) \sum (X_t - \bar{X})^2};$$

$$s_y - \text{среднеквадратичное отклонение ряда } Y = \sqrt{(1/n) \sum (Y_t - \bar{Y})^2}.$$

Оценка кроссквариационной функции:

$$c_{xy}(k) = (1/N) \sum [(X_t - \bar{X})(Y_{t+m} - \bar{Y})] \quad \text{для } 1 < t < N-1, \quad 0 < m < k;$$

$$c_{xy}(k) = (1/N) \sum [(Y_t - \bar{Y})(X_{t+m} - \bar{X})] \quad \text{для } 1 < t < N+1, \quad -1 < m < -k,$$

Стандартная ошибка кросскорреляционного коэффициента $r_{xy}(k)$.

Согласно предположению, что ряды X и Y независимы друг от друга, и что один из рядов состоит только из белого шума, стандартная ошибка кросскорреляции приблизительно равна:

$$StdErr(r_{xy}(k)) = \sqrt{1/(N-k)}, \text{ где } N - \text{число наблюдений в ряде.}$$

В данной работе мы исследовали годовые кросскорреляции (оценка периодических зависимостей между соседними годами) и сезонные (возможные взаимокорреляции зимы, лета и т.д.).

В ходе проведения взаимокорреляционного анализа строили кросскорреляционные функции соседних лет. На Рис.21а-г приведены примеры кросскорреляционных функций конкретно для 1988-1989, 1989-1990, 1990-1991 и 1992 – 1993 годов. Видно, что данные, полученные через месяц, квартал и, особенно, полугодие в разные годы достаточно хорошо коррелируют друг с другом. Особенно сильная корреляция наблюдается между периодами весна-осень, т.е. сезонами с повышенными осадками и ветрами.

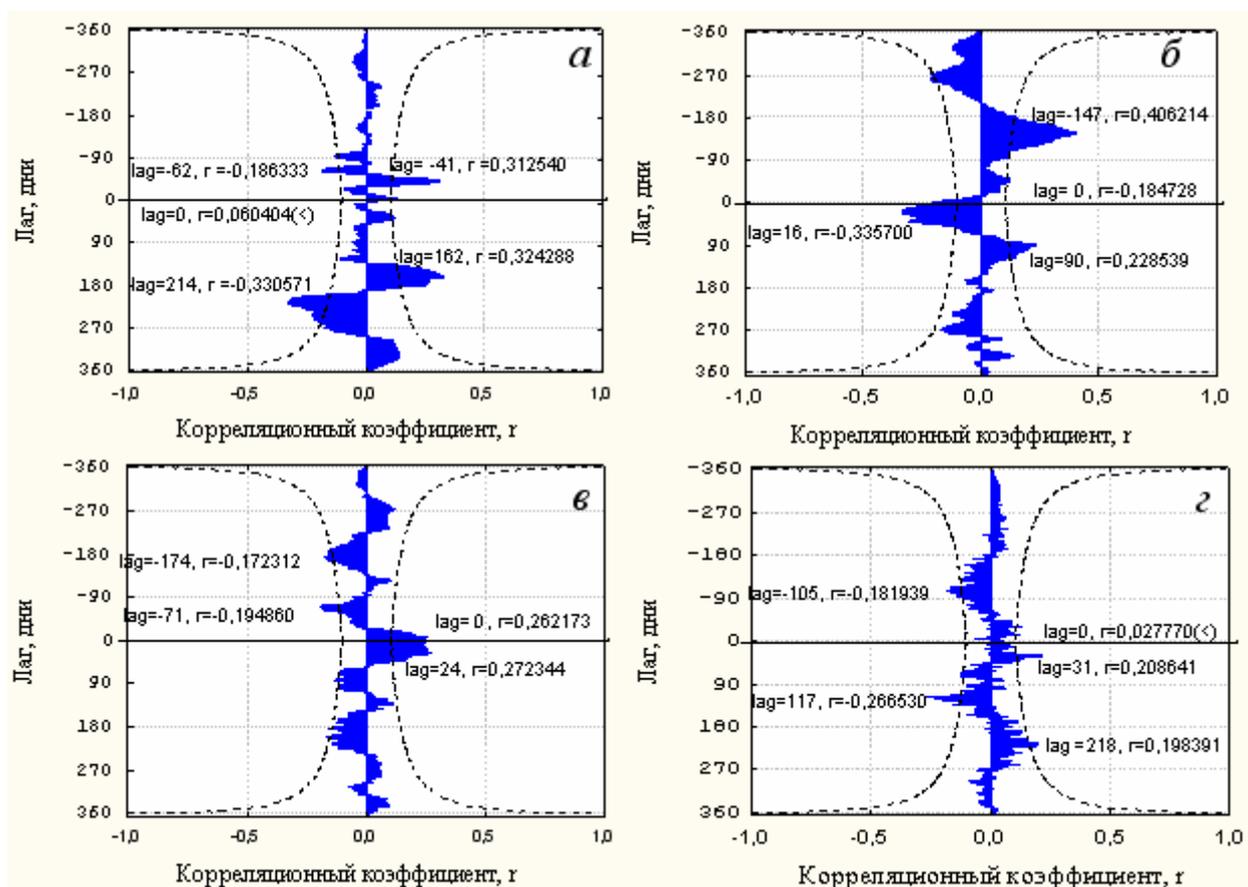


Рис.21 Кросскорреляционные функции некоторых соседних лет: а – 1988 и 1989, б – 1989 и 1990, в – 1990 и 1991, г – 1992 и 1993. На графиках отмечены наиболее значимые величины кросскорреляционных коэффициентов r и соответствующие им значения лага (запаздывания); штриховой линией показан интервал значимых $r > 2\Delta r$.

4. Статистический анализ флуктуаций климатических параметров.

Перейдем теперь к статистической обработке флуктуаций радиационного поля и метеорологических параметров, зарегистрированных в 1996 году. Основное внимание уделим влиянию различных метеопараметров друг на друга, а так же на интенсивность радиационного поля.

Первым этапом было исследование исходной совокупности чисел результатов измерения фона и проведение стандартной обработки данных выборок из измерений конкретного климатического параметра. Функцию распределения фона и метеопараметров оценивали по эмпирической функции распределения. На схемах «а» (Приложение, Рис.П.1(I-VI)) представлены изменения фона и метеопараметров во времени, сглаженные полиномом четвертой степени. Для оценки плотности распределения строили гистограммы распределения всех выборок, что отображено на схемах «б» (Рис.П.1(I-VI)).

Для каждой выборки рассчитывали математическое ожидание, дисперсию, асимметрию и эксцесс (Табл.20), и затем по полученным данным строили диаграмму, основанную на основных моментах γ_1 и γ_2 (аналог карты Пирсона). Данная карта позволяет судить о типе распределения, о близости распределения выборки какому-либо известному виду, а также о смене типа распределения от эксперимента к эксперименту (Рис.22).

Таблица. 20 Статистические параметры совокупностей измерения фона и метеорологических параметров.

Массив	Мин	Макс	Среднее	Дисперсия	Ст. откл.	γ_1	γ_2
γ -фон ($I_{фон}$), мкР/час	7	19	12,799	3,8191	1,95425	-0,284	0,555
Температура, °С	-14,1	34,5	10,391	138,5052	11,76882	-0,106	-0,099
Давление, мм.рт.ст	995	1039	1017,5	62,4686	7,90371	-0,036	0,145
Отн.влажность, %	22	100	68,462	486,7150	22,06162	-0,267	-1,050
Абс.влажность, %	1,1	26,9	9,432	29,1721	5,40112	0,675	-0,095
Скорость ветра, м/с	0	18	6,639	11,4312	3,38101	0,665	0,033

Установлено, что исследуемые выборки можно разбить на четыре типа: давление – симметричное распределение (нормальное или гауссовское распределение); радиационный фон – почти симметричный, но более островерхий пик по сравнению с нормальным распределением; температура и относительная влажность имеют левостороннюю, а скорость, направление ветра и абсолютная влажность обладают правосторонней асимметрией. Интересно отметить, что основные моменты распределений метеопараметров не совпадают с аналогичными значениями для радиационного фона. Наиболее близко к статистическим характеристикам радиационного поля подходят параметры распределения атмосферного давления (и связанного с атмосферным давлением параметра – скорости ветра).

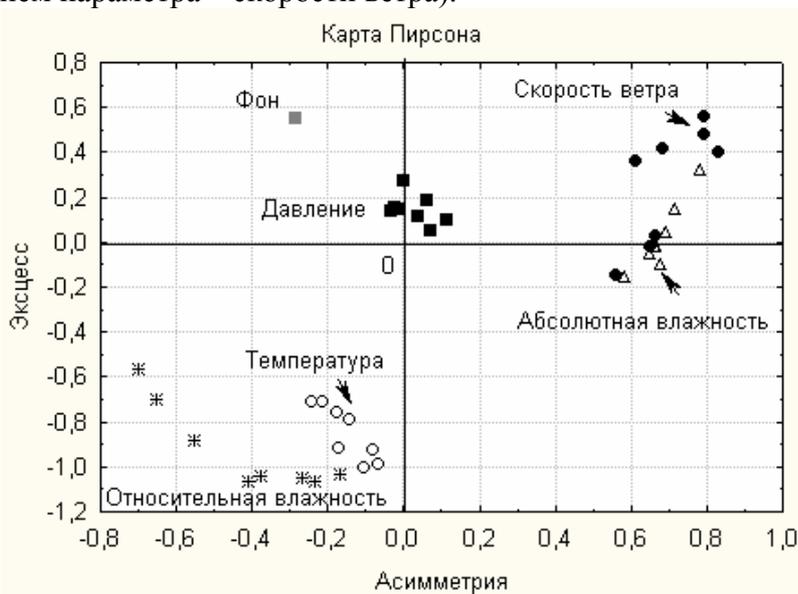


Рис.22 Карта Пирсона с нанесенными на нее значениями асимметрии и эксцесса для фона и климатических параметров (1996 г.).

Визуальную проверку типа распределения проводили с помощью Бокс-диаграммы (Рис.П.1в(I-VI)). Дополнительную проверку нормальности распределения осуществляли путем перестроения гистограммы на вероятностной бумаге (Рис.П.1з(I-VI)).

Обработку исходных массивов заканчивали путем построения графиков взаимовлияния климатических параметров (Рис.П.2(a-u), Рис.П.3), а также трехмерных графиков зависимости радиационного фона от различных климатических параметров (Рис.П.4(a-d)).

Вторым шагом было исследование результатов измерений как временных рядов, зависящих от непрерывного аргумента (времени), подвергающихся нерегулярным случайным воздействиям или флуктуациям и допускающих только статистическое описание. Параметры имеют элемент случайности, а с другой стороны изменяются во времени. Задача состоит в нахождении в них невидимых на первый взгляд закономерностей, скрытых периодичностей, прогнозировании моментов всплеска активности и т. п.

На этом этапе осуществляли прогнозирование будущих значений временного ряда на основе наблюдаемых до данного момента, строили автокорреляционные функции (т.е. постепенно приводили ряд к стационарному), разлагали их в ряды Фурье, определяли регрессионную модель для двух временных рядов с помощью построения и анализа взаимокорреляционных функций. При анализе спектральной функции строили периодограммы фона и метеопараметров (Рис.П.5(a-з)). Периодограмма позволяет проводить анализ высокочастотной области на присутствие четких резонансов. Установлено, что в периоде от 6 часов до 2 суток можно выделить наиболее яркие линии: 8, 12, 24 и 48 часов, другое дело, что не весь набор частот для метеопараметров одинаков по высоте и не всегда эти линии появляются в полном составе. В целом корреляция по частотам событий между различными метеопараметрами достаточно хорошая – в высокочастотной области имеется четкий набор частот.

На интервале более низких частот (от 2 месяцев до года) линии частотного спектра тонут в шумах, интенсивность которых возрастает с уменьшением частоты. Для анализа данных на этом участке была применена Фликкер-спектроскопия [32]. Брали натуральные логарифмы от абсциссы и ординаты периодограммы и аппроксимировали на прямую (Рис.23, табл. 21, см. так же Приложение, Рис.П.6(a-ж)). При построении всех прямых на одном графике видно, что к γ -фону ближе всего располагается температура.

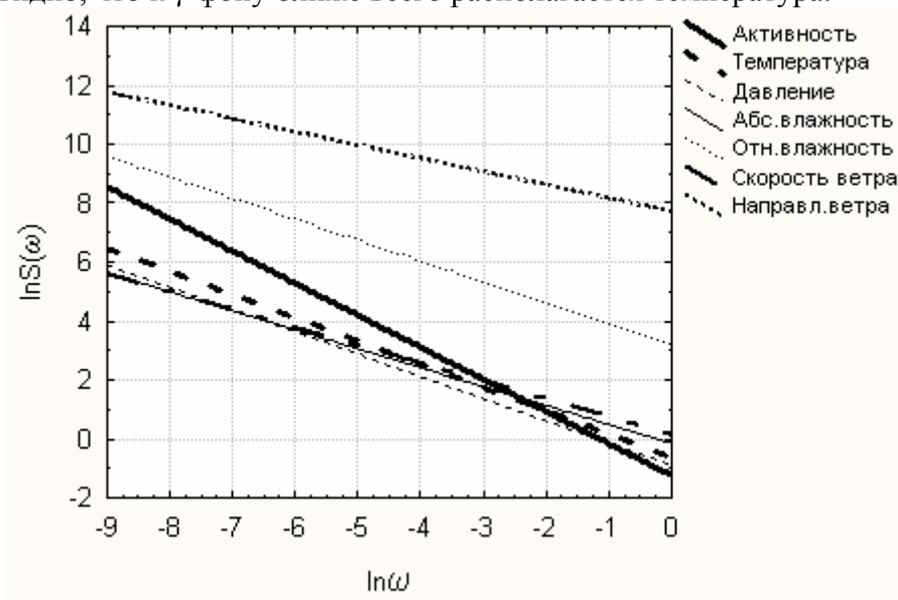


Рис.23 Спектры Фурье климатических параметров и фона

Табл.21 Показатели фрактала для климатических параметров и фона

Параметр	k	D
Массив		
Активность	1,0891	2,4555
Температура	0,7890	2,6055
Давление	0,7543	2,6229
Абс.влажность	0,6435	2,6783
Отн.влажность	0,7088	2,6456
Скорость ветра	0,6067	2,6967
Направление ветра	0,4497	2,7752

В ходе проведения взаимокорреляционного анализа строили кросс-корреляционные функции зависимости активности от метеопараметров (Рис.П.7(a-e)). Такой вид анализа называется анализом распределенных запаздываний, так как один ряд запаздывает относительно другого. Установлено, что в случае мгновенной реакции фона на внешнее воздействие, наиболее сильно влияют температура ($r = 0,31$) и абсолютная влажность ($r = 0,32$). По мере роста лага величина коэффициента увеличивается до $r = 0,36$ при $lag = 38$, по мере роста лага коэффициент корреляции для абсолютной влажности остается примерно постоянным и лишь затем уменьшается. Напротив, атмосферное давление работает в противофазе с фоном. Факт влияния температуры и давления физически понятен и вызван, по видимому, существенным вкладом радона, выделяющегося из почвы.

На завершающем этапе проводили анализ тренда. Для выявления временного тренда экспериментальные кривые нормировали на максимальное значение, а затем сглаживали методом наименьших квадратов по правилу к ближайших соседей. Локально аппроксимированные исходные данные для всех метеопараметров за исключением направления ветра приведены на Рис.24.

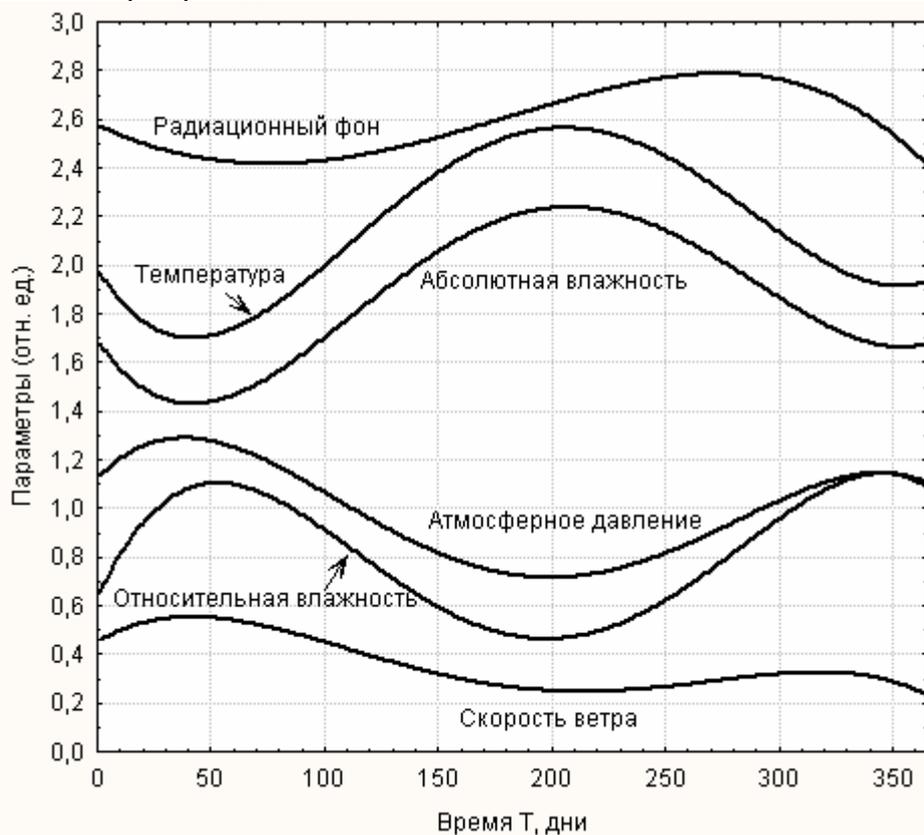


Рис.24 Радиационный фон и метеопараметры г. Мариуполя в 1996г.

Визуальное рассмотрение хода сглаженной кривой фона показывает, что в течение года он не остается постоянным: в зимние месяцы он меньше чем летом. Это означает, что основную долю в показание радиометра вносит не излучение от радионуклидов в почве, строительных материалах и т. д. (постоянные источники излучения), а излучение от радионуклидов в газовой фазе (например, аэрозолей).

Характер влияющих на радиационное поле компонентов весьма многозначен. Известно, что содержание аэрозолей в воздухе, качественный и количественный состав адсорбированных на них радионуклидов, существенным образом зависит от температуры, атм. давления, влажности, скорости и направления ветра, типа и интенсивности осадков. Интенсивность и степень открытости источников поступления радионуклидов в атмосферу также существенно зависят от метеоусловий. Например, выделение радона из почвы практически полностью блокируется снежным покровом. Если основным источником радиации являются черные пески, то лимитирующими параметрами оказываются скорость и направление ветра.

Полученные результаты по колебаниям радиационного поля в исследуемом регионе положены в основу обширной программы работы по прогнозированию и управлению радиационным риском в целях улучшения экологической обстановки в районе северного побережья Азовского моря.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование показало, что гамма-радиационный фон в районе г. Мариуполя и на прилегающей к нему курортной зоне побережья Азовского моря изменяется в широких пределах, как в течение года, так и от года к году на протяжении достаточно протяженного периода времени. Дозовая нагрузка на население региона также непрерывно флуктуирует. Климатические параметры, в свою очередь, колеблются (в течение суток, года, десятилетия). Резкие изменения значений некоторых из этих параметров (перепады давлений и температур, смена влажных ветров на суховеи, переход от штиля к пылевым бурям и т.п.) отрицательно сказываются на здоровье людей. Совпадение во времени радиационных и неблагоприятных климатических факторов увеличивает медицинский риск как коренного населения, так и отдыхающих. Важно, что при этом могут возникать эффекты синергизма – величина суммарного последствия от нескольких воздействий оказывается выше, чем формальная сумма каждого последствия.

В настоящей работе путем статистического анализа флуктуаций радиационного фона выявлены временные интервалы возникновения аномально высоких значений радиационного фона и моменты корреляций этих значений с критическими сменами величин климатических параметров.

В результате исследования получены полные статистические характеристики флуктуаций радиационного поля в г. Мариуполе в течение 16 лет (1988-2003 годы). Рассчитано среднее значение фона, дисперсия, начальные, центральные и основные моменты распределений, построены гистограммы распределения (в обычном и вероятностном масштабах), Бокс – диаграммы и т. п. Проверку гипотезы о типе распределения проводили с использованием всех основных критериев: Колмогорова-Смирнова, Пирсона и др. Обнаружено, что массив данных по гамма-фону не подчиняется ни одному из широко распространенных распределений (нормальному, логнормальному, Пуассона и др.). Свяzano это, по-видимому, с наличием в данных сильного временного дрейфа.

Среднее значение фона монотонно изменяется во времени, причем тренд носит достаточно сложный характер: на монотонное падение интенсивности фона в начале измерений, связанное скорее всего с распадом «чернобыльских» радионуклидов, накладываются гармонические колебания разной частоты. Среди низких базовых периодов колебаний можно выделить период в три года и, возможно, период 7 лет. Надежно идентифицировать низкие и сверхнизкие частоты, в рамках настоящей работы не представлялось возможным, из-за ограниченности временных рамок измерений (16 лет) – детальный анализ характера низкочастотных колебаний требует времен на менее 50-ти лет. Чем именно вызвано появление низкочастотных колебаний точно не установлено, но не исключено, что оно связано не столько с земными причинами, сколько с космическими, в первую очередь – с колебаниями интенсивности солнечной активности и сопутствующими им колебаниями плотности потока космических лучей.

В среднечастотной области выделяются колебания с периодом 1 месяц и, что более характерно, периодом 1 квартал. Сезонность колебания интенсивности гамма фона, свидетельствует о земных причинах, вызывающих эти колебания. Действительно, средняя величина фона весной и осенью, существенно выше, чем зимой и летом. Это становится понятным, если учесть интенсивность и направление господствующих ветров в эти времена года. Для зимы и лета характерны штили и ветра с моря, тогда как весной и осенью в этом регионе господствуют сильные ветра с суши, часто поднимающие пылевые бури, несущие на город монацитовые (радиоактивные) пески.

В настоящей работе существенное внимание было уделено анализу высокочастотной составляющей флуктуаций радиационного фона. К сожалению, исследовать достаточно высокие частоты не представлялось возможным, поскольку

измерения фона проводили один раз в сутки, что, естественно, исключало возможность анализа колебаний в суточный период.

Статистическому рассмотрению подвергался массив данных, полученный путем вычитания из исходных данных тренда. Была предпринята попытка подгонки по МНК (методу наименьших квадратов) различных функций тренда: линейный, параболический, полином 4-й степени, полигармонический и др. Наилучшие результаты дала аппроксимация тренда суммой функций: полинома 2-й степени и суммы двух гармонических колебаний (каждое описывается как сумма синусов и косинусов) с кратными частотами. Дрейф остатков, полученный после вычитания из исходных данных оптимального тренда, анализировали всеми основными методами стандартного статистического анализа. Обработка показала, что дрейф остатков, хотя и близок к нормальному распределению (некоторые критерии формально подтвердили справедливость гипотезы о нормальном характере распределения этих величин), все же не описывается им. Возможно, дрейф остатков – суперпозиция нескольких разных распределений, поскольку на флуктуации фона влияют различные причины, как земного, так и внеземного происхождения, каждая из которых может подчиняться своему распределению.

Важнейшее значение имеет вопрос о степени упорядоченности колебаний радиационного фона. К сожалению, комплект программ STATISTICA, весьма полезный при проведении стандартного анализа, оказался не способным решить поставленную задачу. Поэтому в этой части работы, мы опирались на недавно развитый подход к анализу детерминированного хаоса, опирающийся на так называемую фликкер-спектроскопию, получившего название фликкер-шумовой спектроскопии (*Flicker-Noise Spectroscopy – FNS*) [32].

Согласно этому подходу полагают, что общие принципы эволюции сложных нелинейных систем в условиях их статистической стационарности (при наличии источника и стока энергии) позволяют понять всеобщность и универсальность масштабной инвариантности (скейлинг) степенных законов природы, равно проявляющихся в естественнонаучных исследованиях и гуманитарных науках. В основе концепции – постулат о наиболее общем характере эволюции динамической переменной в виде интермитанса (intermittency, перемежаемость), причем основными и единственными «маркерами» эволюционного процесса являются динамическими всплески (релаксирующие «стохастические автоколебания») и резкие скачки значений наблюдаемых переменных. В качестве феноменологических параметров, характеризующих состояние рассматриваемых систем, выступают компоненты вектора энтропии, имеющие смысл скорости потери информации (степени коррелированности) во временной последовательности реализующихся динамических всплесков и скачков измеряемых параметров.

Используемый в нашей работе алгоритм предполагал построение спектров автокорреляторов и разностных моментов различных порядков для исходных и новых рядов, получаемых путем последовательного дифференцирования исходных. Простые выражения для указанных зависимостей позволили получить количественную информацию о характере релаксации формирующихся нелинейных локальных возбуждений и позволили прогнозировать эволюцию этих систем. При этом степенные спектральные закономерности определяются коррелированной последовательностью динамических всплесков измеряемых переменных, а разностные моменты различных порядков для исходных временных рядов – исключительно скачками измеряемых переменных в низкочастотном пределе.

Наблюдаемые зависимости (например, спектр мощности Фурье-спектроскопии) мы стремились свести к простой показательной функции. При этом мы попытались перенести идеи геометрии фракталов [36, 37] на анализ временных зависимостей. Первая стадия данного подхода – применение обычного разложения Фурье к исследуемому ряду чисел.

Затем, зависимость спектра мощности от частоты перестраивали в двойном логарифмическом масштабе и анализировали полученные графики. При этом параметр k (тангенс угла наклона прямой зависимости логарифма спектра мощности от логарифма частоты) – определяет степень детерминированности (т.е. меру порядка) в хаосе. Известно, что параметр k связан с параметром фрактальной размерности: $k = 2(3 - D)$, где $D > 1$ – фрактальная размерность [34].

Оказалось, что во всех исследованных в данной работе случаях, подавляющее число полученных таким образом точек попадает на прямую линию, т.е. наши данные могут быть квалифицированы как типичный фликкер-шум. Тангенс наклона такой линии в нашей работе никогда не был равен нулю, как это было бы в случае «белого шума», т.е. при полной разупорядоченности данных. Рассчитанный из величины тангенса наклона прямой показатель фрактала свидетельствует о достаточно хорошей внутренней упорядоченности массива дрейфа остатков фона.

Нам представляется, что использованный здесь подход позволяет извлечь информацию из хаотических сигналов природных объектов, поскольку удастся выяснить какие именно временные переменные наиболее полно характеризуют эволюцию исследуемой системы. В работе установлено, что эволюция фона происходит дискретно. Интенсивность гамма-фона, измеряемая радиометром, изменяется нерегулярно – скачками и всплесками. Наложение таких нерегулярностей придает сигналу хаотический вид. Однако, эти сбои не являются полностью хаотичными – они упорядочены в том смысле, что хоть и редко, но повторяются, идут «волновыми пакетами» и т. п. Более того, эти сбои, или нерегулярности, можно классифицировать по типам, а затем извлечь нужное число информационных «паспортных параметров» для каждой системы. Важное преимущество фрактальной геометрии – возможность сравнения степени упорядоченности различных временных рядов (в нашем случае – радиационного фона и климатических параметров).

В данной работе были выбраны адекватные математические модели флуктуаций, как зарегистрированных значений радиационного фона, так и дрейфа остатков, полученного из исходного массива путем вычитания тренда. Как обычно, использовали стандартные модели: белый шум, скользящее среднее, процесс авторегрессии первого, второго и p -го порядков, процесс скользящего среднего, модель комбинированного процесса авторегрессии-скользящего среднего, а также модель авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего, $ARIMA(p,r,q)$, которая и была принята как наиболее адекватная модель описания статистических флуктуаций радиационного поля.

Прогноз и доверительный интервал для него приведен на Рис.25.

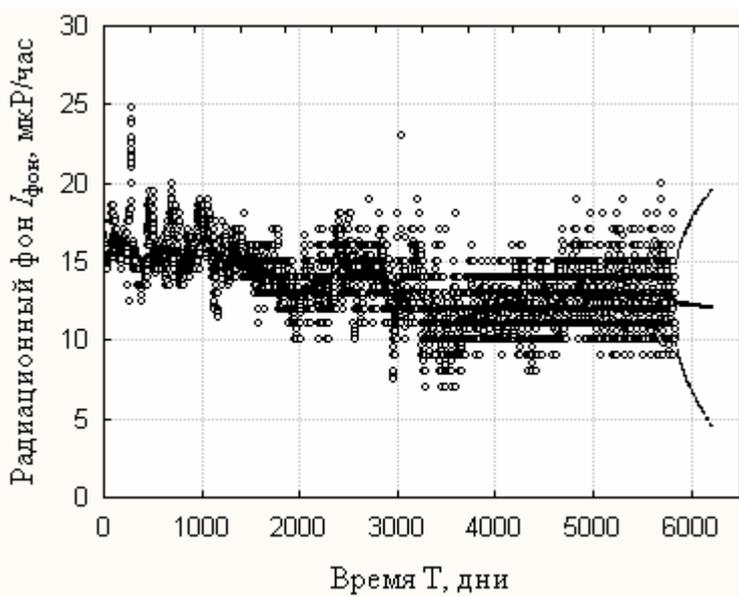


Рис.25 Изменения интенсивности радиационного поля в г.Мариуполе в 1988-2003гг, в конце массива – экстраполяция на следующий год и доверительные интервалы для этой экстраполяции.

Расчеты показали, что значение радиационного фона, зарегистрированного в данный момент времени, зависит от нескольких предыдущих значений. Это говорит о том, что на конкретное значение фона оказывают влияние некоторые предшествующие долговременные процессы.

Например, если величина фона как-то связана с излучением от изотопов радона (точнее, с излучением их продуктов распада), то концентрация радона в воздухе определится интенсивностью выделения радона из почвы. Поток радона из почвы лимитируется диффузией его по порам и управляется коэффициентом диффузии, который достаточно сильно зависит от температуры окружающей среды. Температура почвы зависит от температуры атмосферы (солнечной радиации, силы и направления ветра). При этом смена температуры воздуха не приводит к мгновенному изменению температуры почвы – скорость прогрева почвы и достигаемые предельные температуры определяются такими параметрами, как теплопроводность и теплоемкость почвы. Поскольку прогрев почвы требует определенного времени, то и достижение стационарного режима эманации и, следовательно, устойчивых показаний счетчика излучений, так же требует определенного времени (особенно много времени требуется на таяние снега и на высушивание почвы). Поэтому не удивительно, что текущие показания радиометра оказались в определенной зависимости от предыдущих значений.

Выбор адекватной модели статистического процесса имеет важное значение с точки зрения предсказания его развития. В данной работе был составлен долгосрочный прогноз будущего изменения как средних значений радиационного фона в г. Мариуполе, так и статистических флуктуаций фона.

Во второй части работы мы провели статистический анализ флуктуаций климатических параметров в северной части Азовского моря (атмосферное давление, температура воздуха, относительная и абсолютная влажность воздуха, направление и скорость ветра) с целью изучения характера влияния этих параметров друг на друга и на интенсивность радиационного фона. В нашем распоряжении находились данные за 1996 год. Преимущество их было в том, что измерения каждого параметра проводили 8 раз в сутки, что позволило исследовать высокочастотную составляющую спектра конкретного параметра. В то же время этих данных недостаточно для анализа низкочастотной составляющей спектра (нужны данные по крайней мере за три года).

Анализ проводили в стандартном режиме. Осуществляли дисперсионный и регрессионный анализы каждого параметра, рассчитывали автокорреляционные и частные автокорреляционные функции, осуществлялась Фурье и фликкер-спектрокопия. Анализировали исходные массивы, тренды и дрейфы остатков.

В результате работы получены математические выражения для трендов всех параметров и продемонстрировано изменение среднего значения каждого параметра в течение года. Как и ожидалось, временной дрейф некоторых параметров проходит в фазе с другими, а некоторых – в противофазе (изменения некоторых параметров никак не влияют на изменения других). Построены зависимости (в том числе – трехмерные) одних климатических параметров от других, рассчитаны величины соответствующих коэффициентов корреляции. Показано, что далеко не все климатические параметры можно считать независимыми переменными. Так, влажность воздуха существенно зависит от температуры атмосферы, температура – от направления и скорости ветра, скорость ветра и абсолютная влажность – от атмосферного давления, влажность – от направления ветра и т. п. Поэтому при дальнейшем анализе число переменных, используемых для построения математических моделей, может быть уменьшено.

Исследования зависимости значений фона, измеренного в 12 часов дня, от значений климатических параметров, измеренных в то же время, показали, что климатические параметры обычно не сильно влияют на величину интенсивности гамма фона. Странным представляется независимость значений фона от скорости ветра и почти полная независимость от атмосферного давления (имеет место небольшой минимум). С ростом абсолютной влажности интенсивность фона возрастает (туман или дождь прижимают продукты распада радона к грунту), но при большой как абсолютной, так и относительной влажности, скорость счета падает (радиоактивные аэрозоли вымываются из атмосферы). Интенсивность фона явно зависит от температуры: при средних (весеннее-

осенних) температурах фон максимален, а при низких (зима) и высоких (лето) температурах радиационный фон минимален. Следует иметь в виду, что парное рассмотрение взаимных влияний – мало информативно. Во-первых, климатические параметры одновременно влияют на интенсивность радиационного фона, но влияют по-разному, часто нивелируя суммарный эффект. Во-вторых, это влияние существенно зависит от сезона. Так, летом, чем сильнее ветер, тем слабее фон (ветер вымывает местный радон и уносит его из города), тогда как осенью, чем сильнее ветер, тем выше фон (ветер приносит с суши радиоактивные пески). Количественно подобные эффекты можно будет охарактеризовать, если в нашем распоряжении окажутся данные по измерению значений радиационного фона 8 раз в сутки (измерений фона 1 раз в сутки для этих целей совершенно недостаточно).

В работе существенное внимание уделено исследованию кросскорреляций разных климатических параметров и кросскорреляций типа радиационный фон – конкретный климатический параметр. Практически для всех климатических параметров обнаружены суточные и сезонные взаимные статистические корреляции, для фона и климата – сезонные корреляции.

Для всех исследованных в работе рядов чисел в рамках модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего, $ARIMA(p,r,q)$, подобран адекватный вариант модели и проведена экстраполяция на будущие времена.

Теория детерминированного хаоса и модель авторегрессии были применены к анализу степени упорядочения массивов климатических параметров. Как уже было указано, при рассмотрении радиационного фона, каждый ряд для конкретного климатического параметра подвергали разложению Фурье и фликкер-спектроскопии. Выходным параметром каждый раз служил показатель фрактала. Показано, что наиболее близко к значению показателя фрактала для фона-96 подходит значение фрактала для температуры воздуха.

Согласно результатам проведенной работы можно предложить следующий механизм возникновения и эволюции радиационного гамма-фона в северной части Азовского моря. На интенсивность фона несомненно оказывает влияние космические процессы и связанные с ними космические излучения (как первичные, так и вторичные). Особенно наглядно это проявляется в долговременном плане. Техногенные радионуклиды оказали влияние на эволюцию гамма-фона только в период, близко прилегающий к дате Чернобыльской катастрофы (1986г). Выбросы радионуклидов с близлежащих АЭС никак себя не проявляют. Природные радионуклиды, несомненно, влияют на величину гамма-фона. При этом какого-то влияния на фон жесткого гамма-излучателя калия-40 не обнаружено: при преобладании ветров, дующих с моря и несущих калиевые аэрозоли, роста фона не наблюдается. Более значительна роль изотопов радона (как радона-222, так и радона-220), точнее – их продуктов распада (активного налета). При этом можно выделить два источника радона: 1) «местный» радон, т.е. радон, образующийся из минералов урана и тория, содержащихся в грунтах и почве города и выделяющийся непосредственно в районе метеостанции и 2) радон, выделяющийся из монацитовых песков, поднимаемых в воздух песчаными бурями, и приносимыми в город. Предположение о существенной роли радоновых рядов генетически связанных радионуклидов в формировании радиационного поля Мариуполя базируется на обнаруженной нами зависимости интенсивности фона от времени года и от климатических условий, преобладающих в отдельные сезоны.

Проведенная работа позволяет оценить величину радиационного (а в более широком смысле – экологического) риска населения, а также предсказать характер развития экологической ситуации в регионе северной части Азовского моря и, конкретно, в г. Мариуполе и в его курортной зоне. Отметим, что используемая здесь идеология может, в принципе, дать более обширную информацию об изучаемых процессах, при условии существенного расширения используемых массивов данных. Следует рекомендовать

органам СЭС проводить измерения радиационного фона и климатических параметров не менее 8 раз в сутки, причем в течение 50-ти лет.

Нам представляется возможным рекомендовать предложенную в данной работе методологию (как математический аппарат, так и программное обеспечение) для статистического анализа любых экологически важных факторов (физические поля, токсины, климатические условия и др.) оказывающих комплексное влияние на биоту и людей.

ВЫВОДЫ

1. Методами математической статистики с учетом идей геометрии фракталов проведен анализ измерений гамма-фона в г. Мариуполе, проведенных в 1988-2003 годах.
2. Установлено, что эволюция интенсивности гамма-поля в северной части Азовского моря сопровождается монотонным падением (распад радионуклидов, занесенных в регион в ходе чернобыльской катастрофы), на который накладываются как низкочастотные (с периодом 3 и 7 лет), так и среднечастотные (период 3 месяца) сезонные колебания.
3. Методом фликкер-спектроскопии обнаружено, что статистическая составляющая колебаний радиационного фона не является чисто случайным явлением («белым шумом»), а достаточно хорошо упорядочена, т.е. имеют место редкие, но повторяющиеся события.
4. Предложена математическая модель флуктуаций радиационного поля и осуществлен прогноз развития радиоэкологической ситуации в регионе.
5. Дано детальное математическое описание флуктуаций климатических параметров в северной части Азовского моря (по данным за 1996 год), построены взаимно-корреляции конкретных климатических параметров и определен характер влияния погодных условий на интенсивность радиационного поля в г. Мариуполе.
6. Показано, что интенсивность радиационного поля в северной части Азовского моря определяется тремя физическими факторами: интенсивностью космического излучения, остаточными последствиями чернобыльской катастрофы и продуктами распада радона, выделяющегося из монацитовых песков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.А.Титаева //Ядерная геохимия. М.: МГУ, 2000. 336с.
2. А.А.Ярошинская //Ядерная энциклопедия. М.: Благотворительный фонд Ярошинской, 1996. 656с.
3. R.Crameri, W.Burkart //The radon problem// Radiat.Phys.Chem. 1989. V.34. №2. С.251.
4. А.В.Tanner //Radon migration in the ground: a supplementary review// The Natural Radiat. Environ. 1978. V.1. P.5.
5. S.D.Schery, D.J.Holford, J.L.Wilson, F.M.Philips //The flow and diffusion of radon isotopes in fractured porous media: Part 1, Finite slabs// Radiat. Protection Dosimetry. 1988. V.24. №1/4. P.185.
6. S.D.Schery, D.J.Holford, J.L.Wilson, F.M.Philips //The flow and diffusion of radon isotopes in fractured porous media: Part 2, Semi-infinite media// Radiat. Protection Dosimetry. 1988. V.24. №.1/4. P.191.
7. S.D.Schery, S.Whilstone //Desorption of radon at the Earth's surface// J.Geophys. Res. 1989. V.94. №D15. P.18297.
8. S.D.Schery, P.T.Wasiolek //A two-particle-size model and measurements of radon progeny near the Earth's surface// J.Geophys. Res.1993. V.98. №D12. P.22915.
9. Chi-Yu King //Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes// J.Phys.Res. 1980. V.85. №B6. P.3065.
10. H.Hötzl, R.Winkler //Long-term variation of outdoor radon equilibrium equivalent concentration// Radiat.Environ.Biophys. 1994. P.381.
11. J.Porstendörfer, G.Butterweck, A.Reineking //Daily variation of the radon concentration indoors and outdoors and the influence of meteorological parameters// Health Phys. 1994. V.67. №3. P.283.
12. Б.И.Огородников //Ядерный архипелаг. М.: ИздАт, 1995. 265с.
13. Ю.А.Израэль //Мирные ядерные взрывы и окружающая среда.Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 161с.
14. В.В.Горин, Г.А.Красилов, А.И.Куркин //Семипалатинский полигон: хронология подземных ядерных взрывов и их первичные радиационные эффекты// Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1993. №9. 14с.
15. В.Балек //Обращение с радиоактивными отходами. М.: МАГАТЭ, 1995. 50с.
16. И.И.Крышев //Радиоактивность районов АЭС. М.: Ядерное общество СССР, 1991. 132с.
17. Ю.В.Чечеткин, Е.К.Якшин, В.М.Ещеркин //Очистка радиоактивных газообразных отходов АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986. 275с.
18. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). М.: Минздрав России, 2000.
19. P.H.Zimmermann, J.Feichter, H.R.Rath, P.J.Crutzen, W.Eiss //A Global three-dimensional source-receptor model investigation using ^{85}Kr // Atmosph. Environment. 1989. V.23. №1. 25-35.
20. Отчет Азовской научно-исследовательской станции по радиэкологическим, гидрофизическим и гидрохимическим исследованиям в районе города Мариуполя в 1997-1998 гг. М.: МГУ, 1999.
21. Отчет Химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по проекту «Радиометрическая и радоновая съемка песков пляжей северной части Азовского моря». М.: МГУ, 1999.
22. В.С.Карамза, Г.Б.Рязанцев //Анализ состава россыпей «черных песков» на побережье Азовского моря// Вісник Приазовського Державного технічного університету. 2003. №13, 1-3.

23. Отчет по междисциплинарному научному проекту МД-620/01 Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Проблемы радиоэкологии прибрежных акваторий Азовского и Черного морей». М.: МГУ, 2001.
24. В.П.Боровиков, И.П.Боровиков //Статистический анализ и обработка данных в среде Windows®. М.: Филинь, 1998. 583с.
25. И.Н.Бекман, М.А.Хасков, В.И.Пасека, Л.Е.Панаркина, Г.Б.Рязанцев //Вариации радиационного поля в северной части Азовского моря// Вестн.Моск.ун-та. Сер.2. Химия. 2003. Т.44. №2. С.140
26. В.К.Бельнов //Статистические методы оценки параметров математических моделей химических процессов. М.: МГУ, 1991. 160с.
27. Д.Химмельблау //Анализ процессов статистическими методами. М.: Мир, 1973. 957с.
28. В.А.Рожков, Ю.А.Трапезников //Вероятностные модели океанологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 270с.
29. И.Н.Бекман, М.А.Хасков, В.И.Пасека, Л.Е.Панаркина, Г.Б.Рязанцев //Вариации радиационного поля в северной части Азовского моря// Вестн.Моск.ун-та. Сер.2. Химия. 2003. Т.44. №2. С.140.
30. В.Б.Лукьянов, С.С.Бердоносков, И.О.Богатырев, К.Б.Заборенко, Б.З.Иофа //Радиоактивные индикаторы в химии. Проведение эксперимента и обработка результатов. М.: Высш.шк., 1977. 280с.
31. С.Ф.Тимашев //Методология науки о «сложном»// Журн.физ.химии. 1994. Т.68. №5. С.953.
32. С.Ф.Тимашев //О природе фликкер-шума// Журн.физ.химии. 1993. Т.67. №4. С.798.
33. Д.И.Трубецков //Турбулентность и детерминированный хаос// Сорос.образов.журн. 1998. №1. С.77.
34. В.С.Иванова, А.С.Баланкин, И.Ж.Бунин, А.А.Оксогоев //Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383с.
35. S.I.Serdyukov, V.K.Belnov //Extension of the variational formulation of the Onsager-Machlup theory of fluctuations// Phys.Rev. 1995. V.51. №5. P.4190.
36. Е.Федер //Фракталы. М.: Мир, 1991. 260с.
37. Б.Мандельброт, Дж.Мелроуз, Р.Хильфер //Фракталы в физике. М.: Мир, 1988. 670с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Рис. П.1(I-VI) Предварительная обработка измерений радиационного фона и климатических параметров в, зарегистрированных в 1996 году.

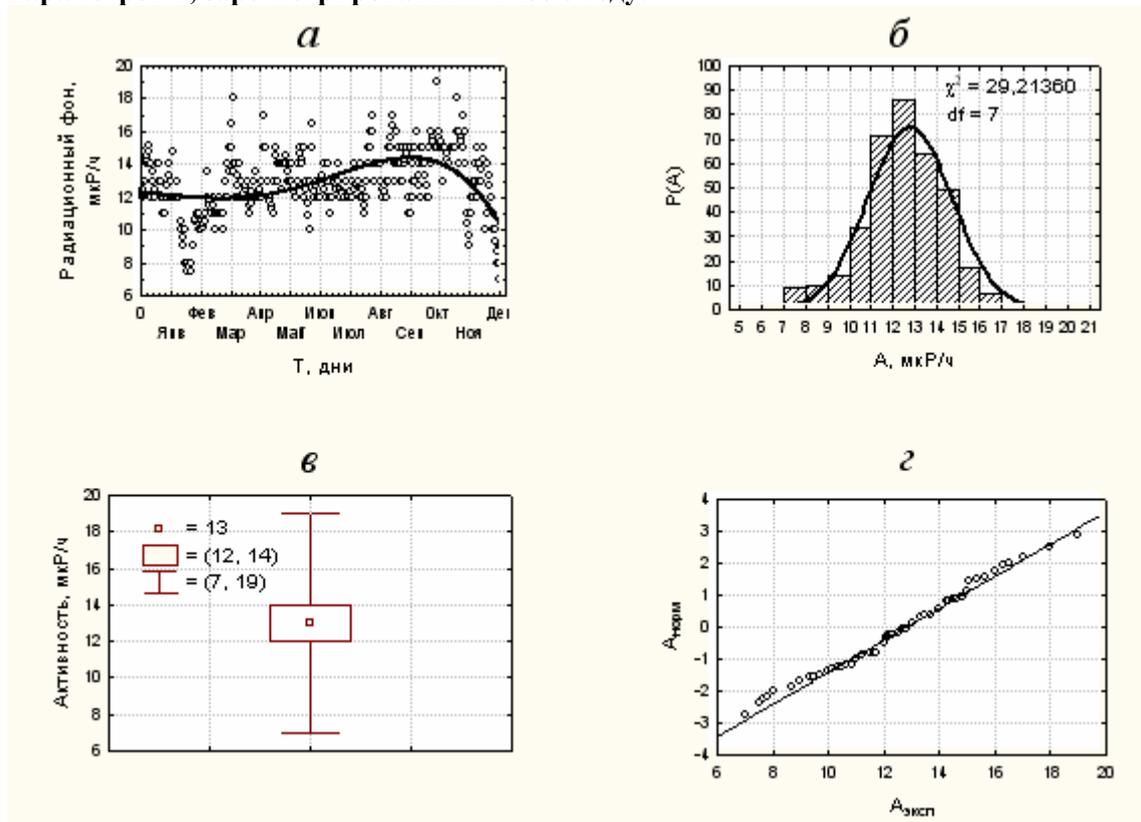


Рис. П.1(I) Радиационный фон.

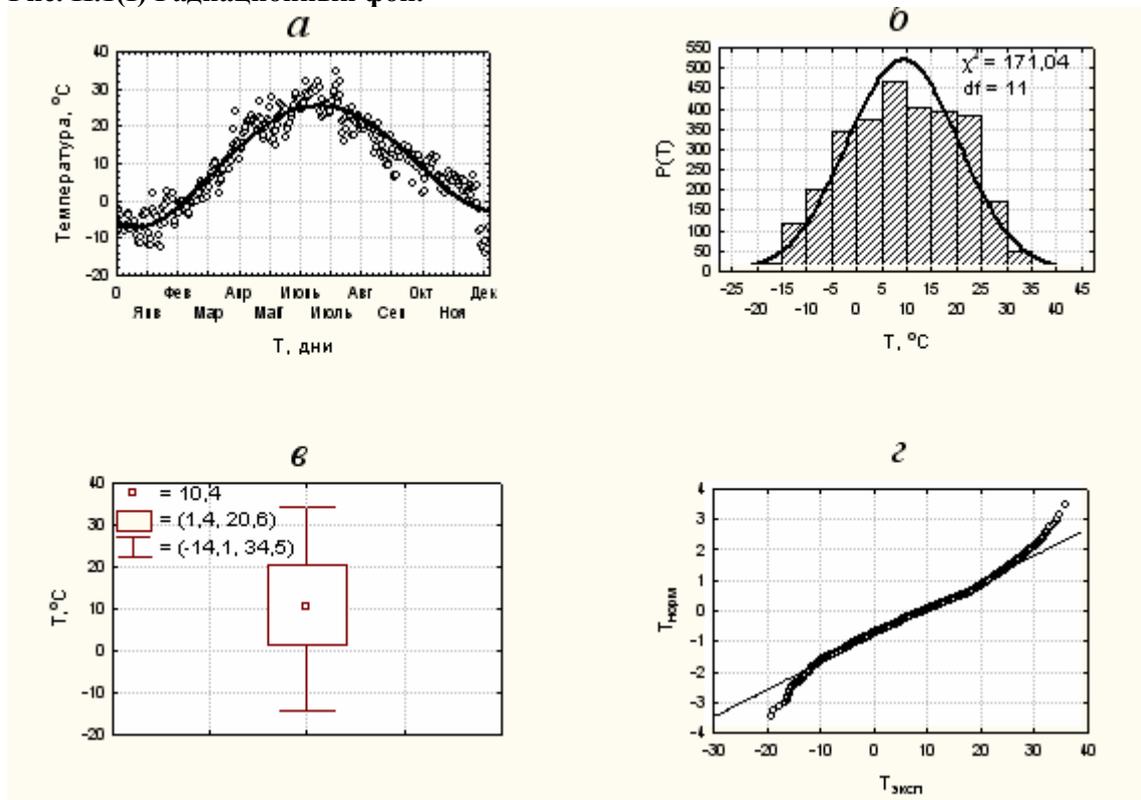


Рис. П.1(II) Температура.

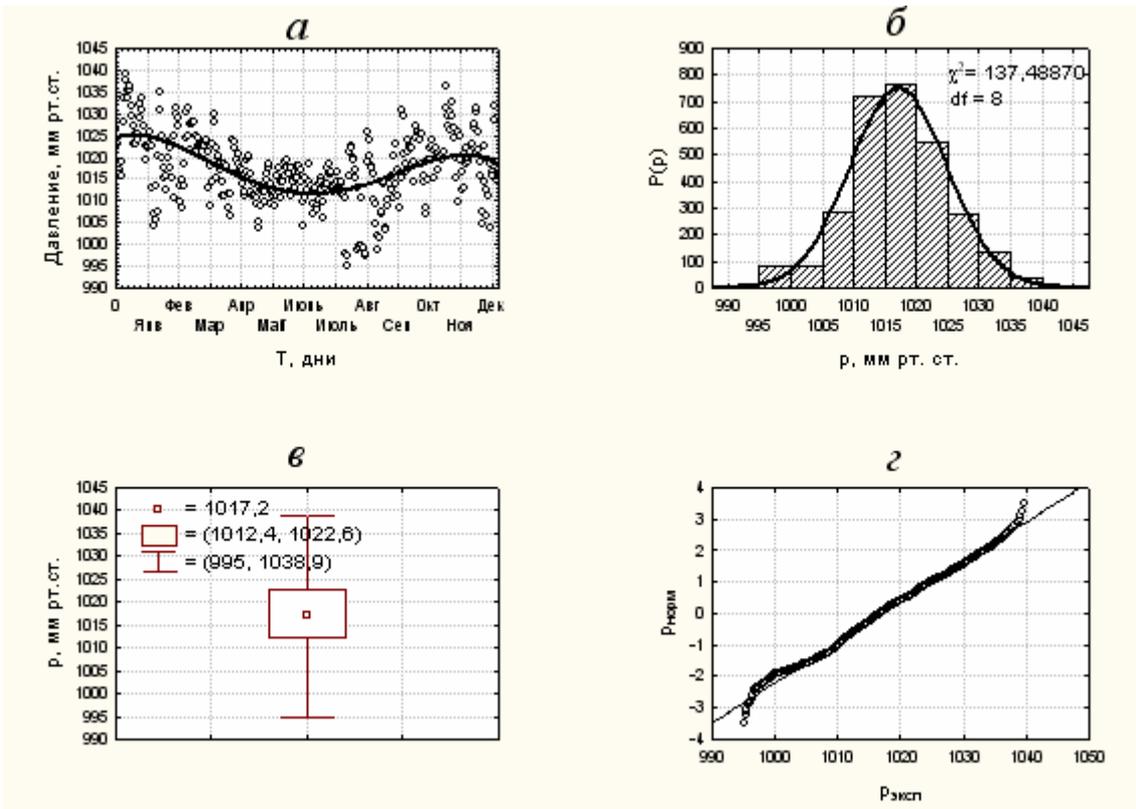


Рис. П.1(III) Атмосферное давление.

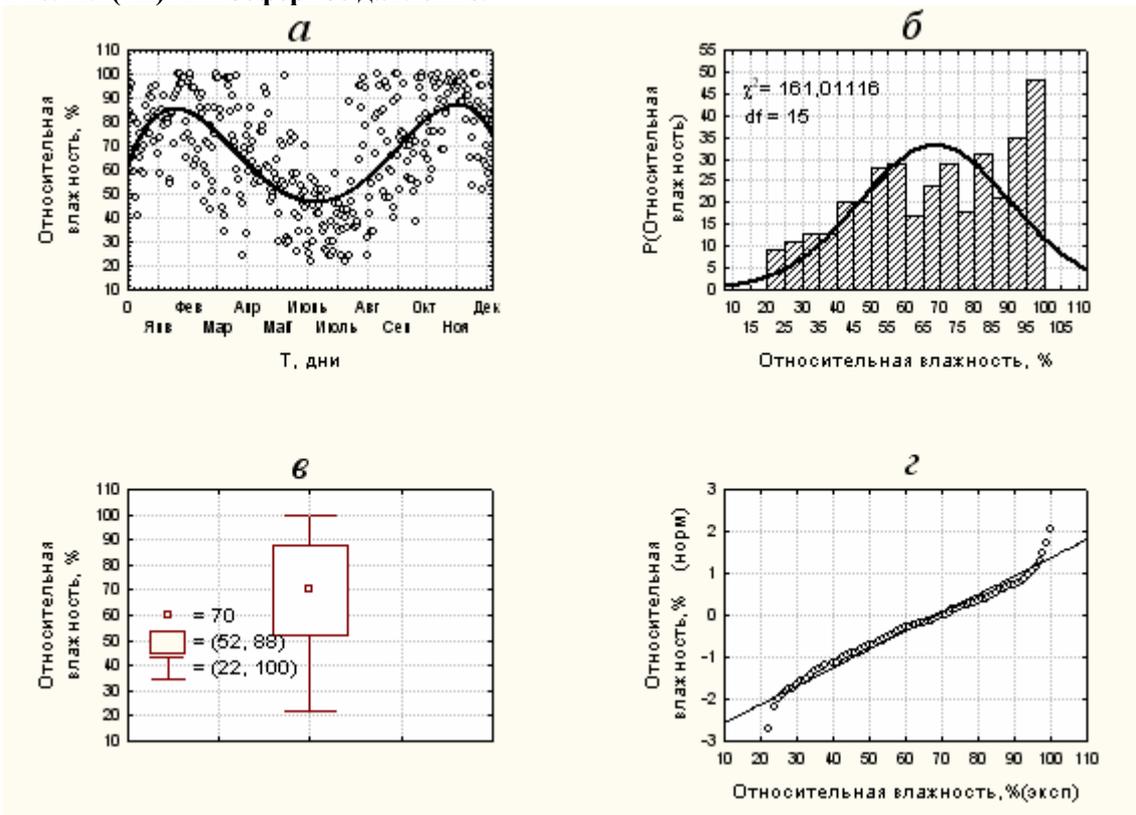


Рис. П.1(IV) Относительная влажность.

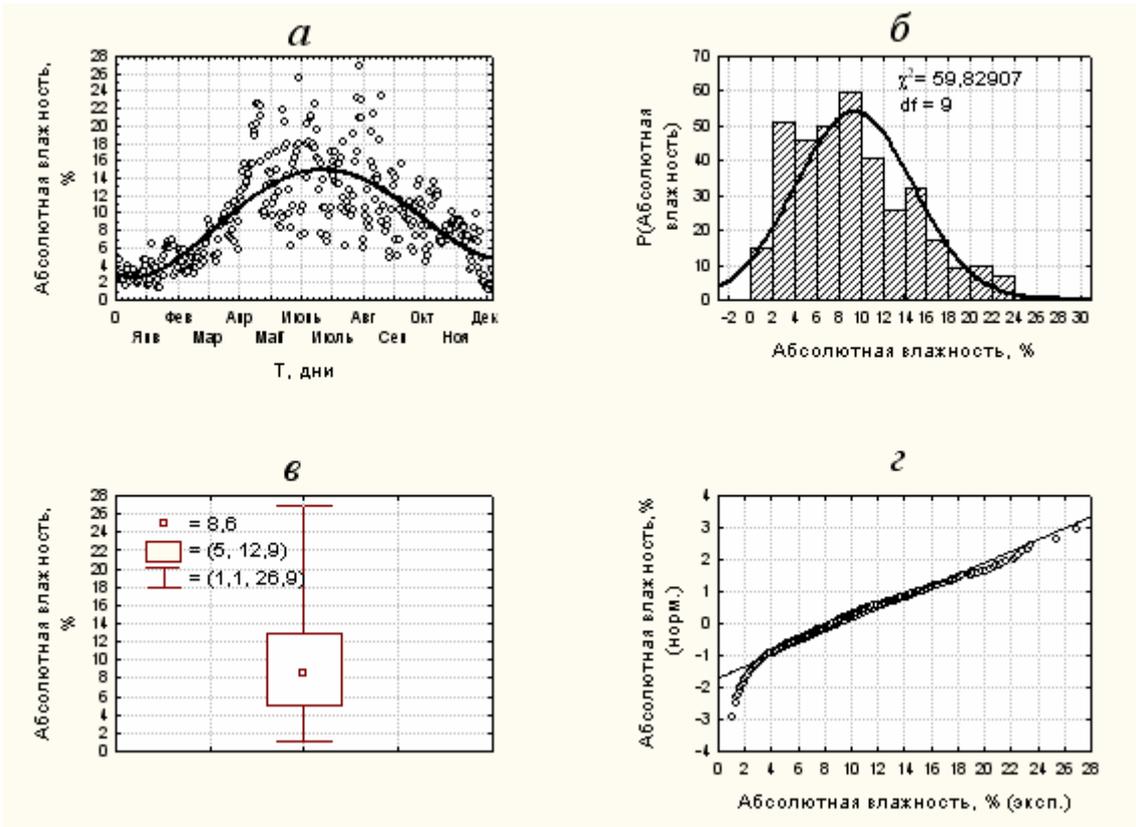


Рис. П.1(V) Абсолютная влажность.

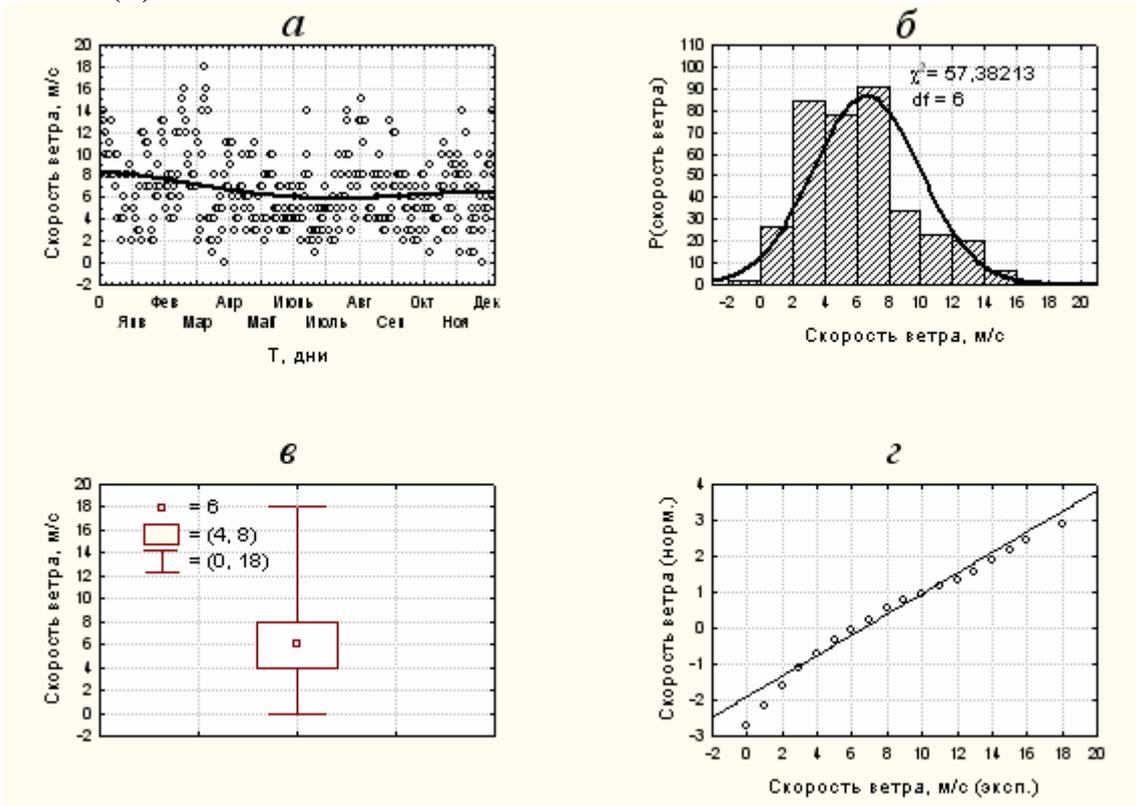
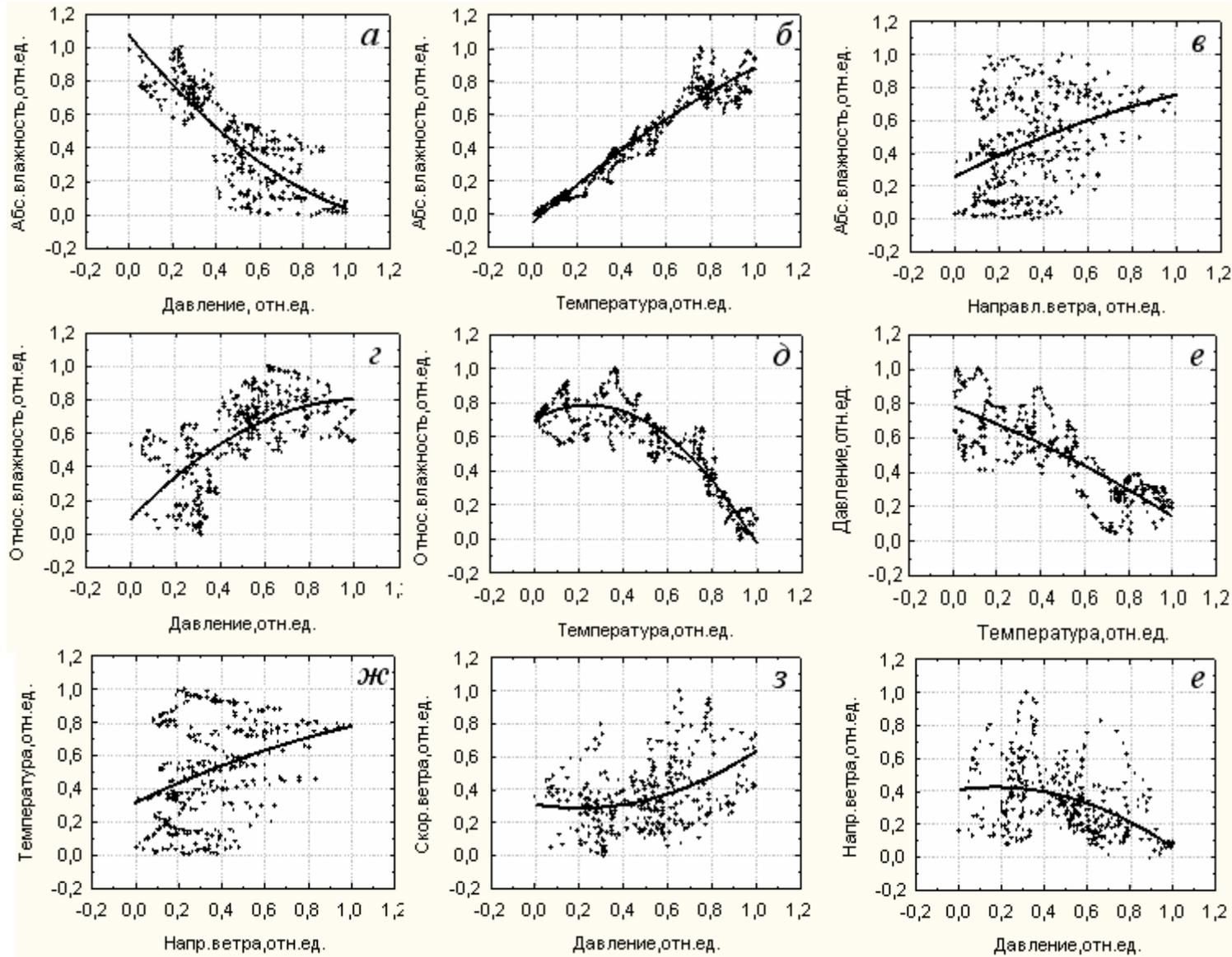


Рис. П.1(VI) Скорость ветра.

Рис.П.2 Взаимовлияние климатических параметров и фона.



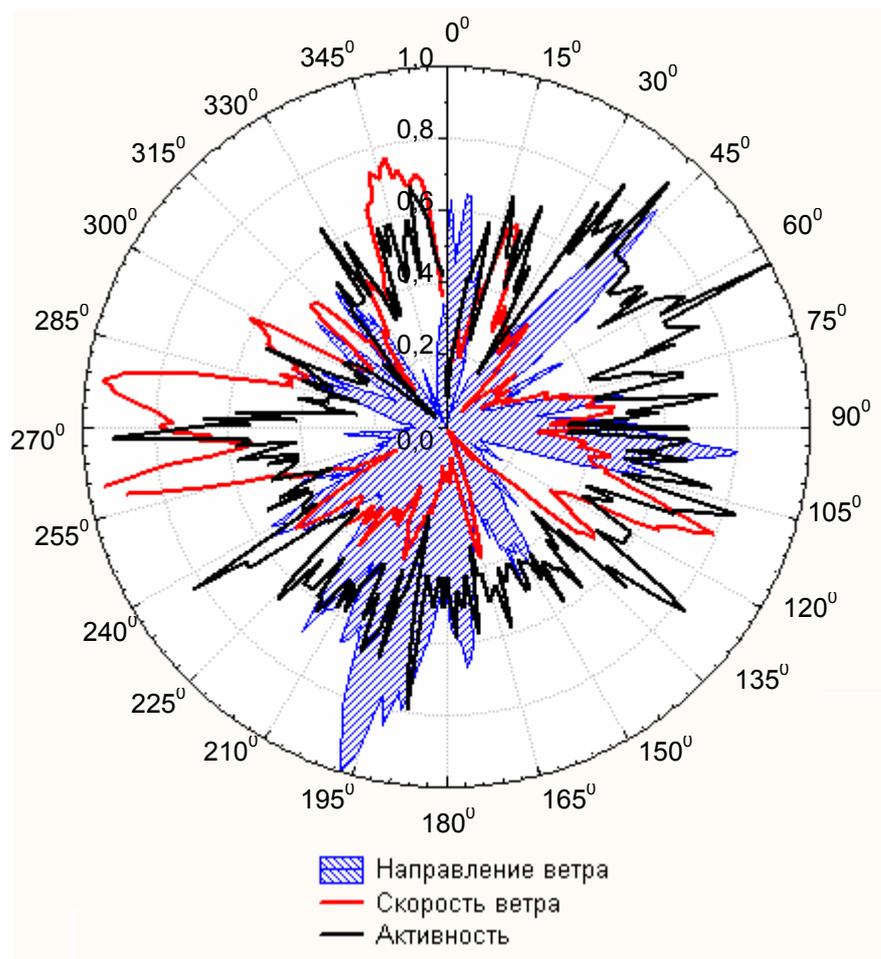


Рис. П.3 Влияние скорости и направления ветра на интенсивность радиационного фона в сферических координатах (роза ветров).

Рис.П.4 Зависимость фона от климатических параметров в 3-мерном виде.

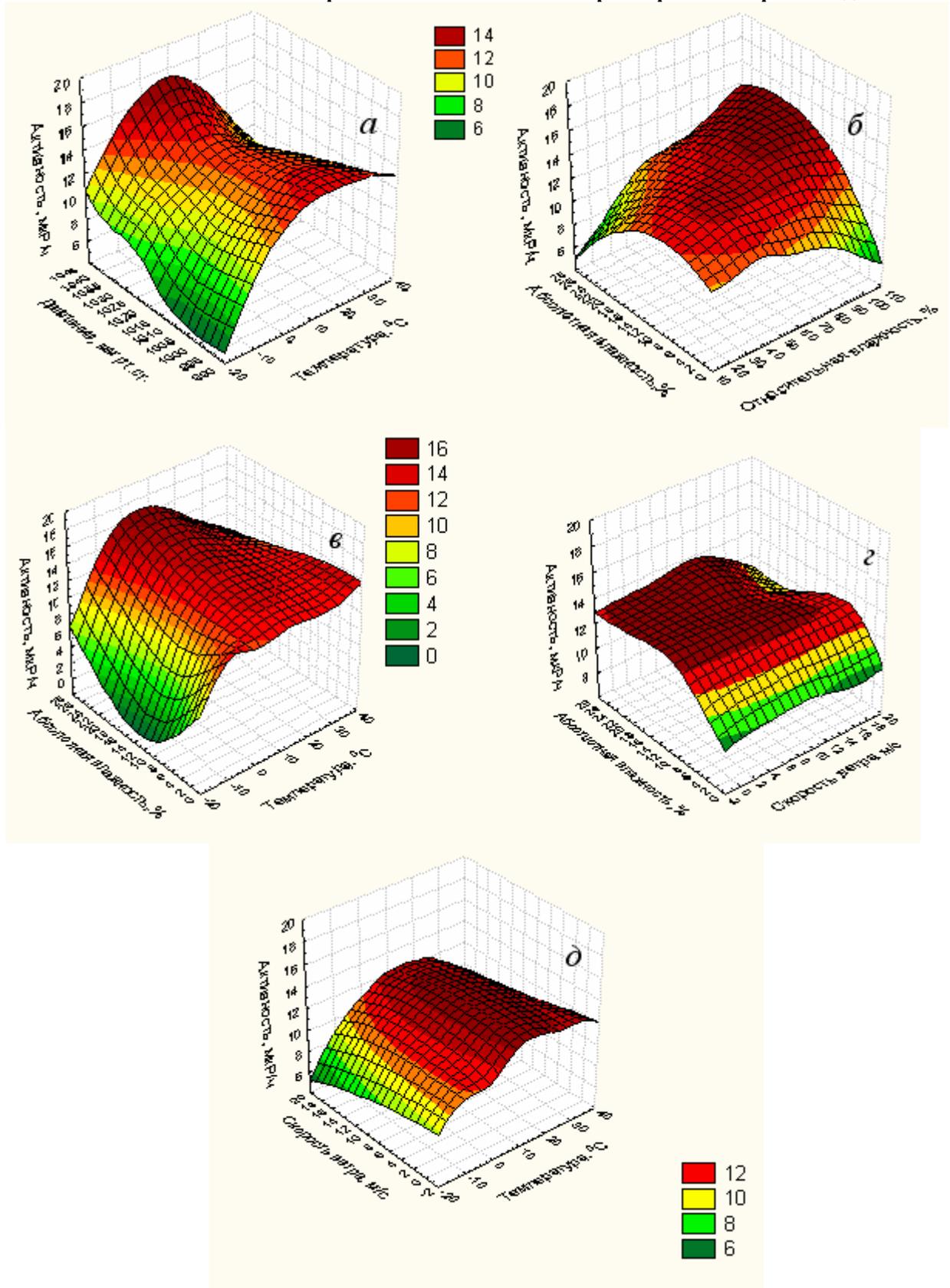


Рис.П.5 Периодограммы климатических параметров и фона.

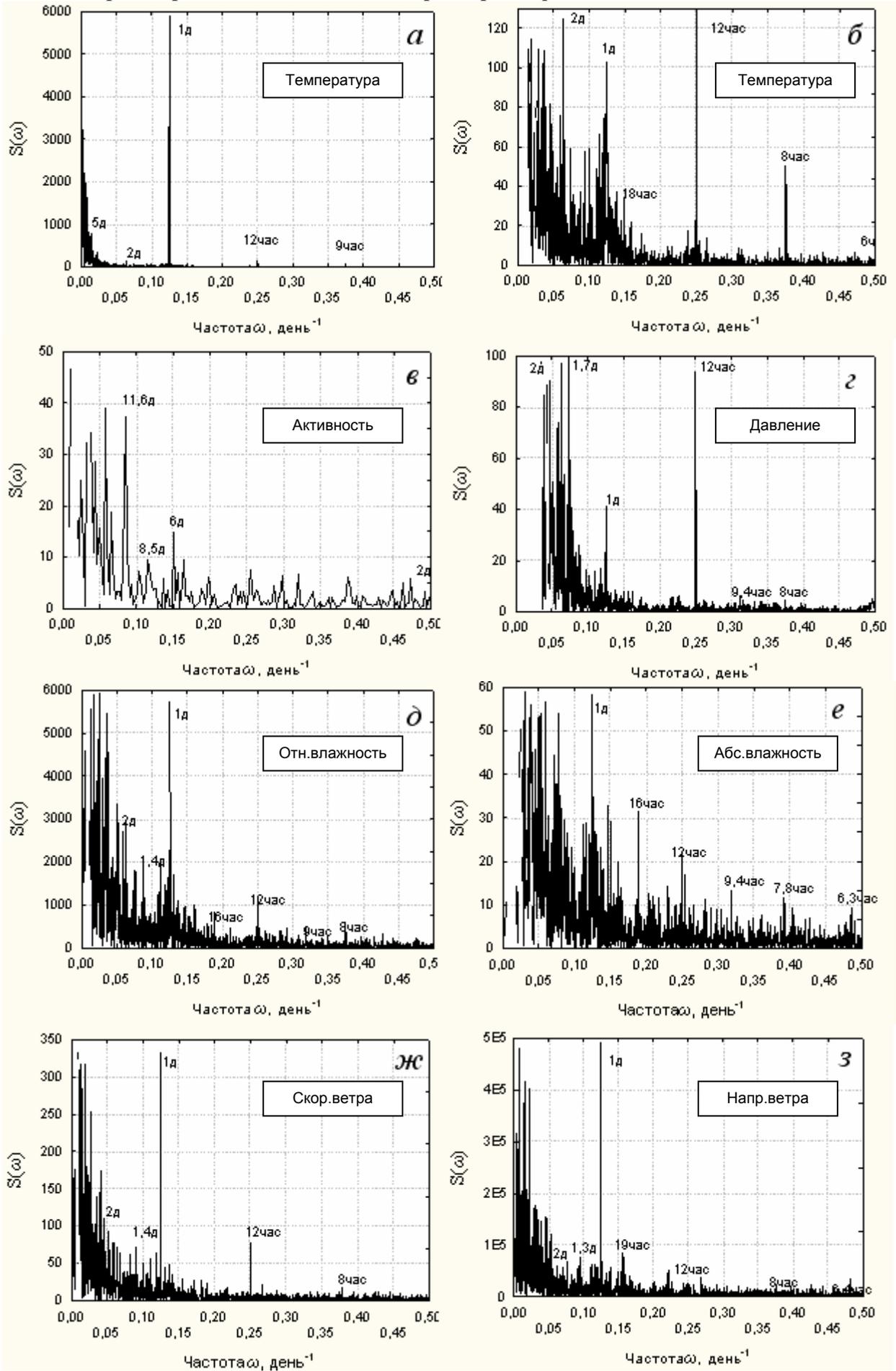


Рис.П.6 Спектры Фурье радиационного фона и климатических параметров

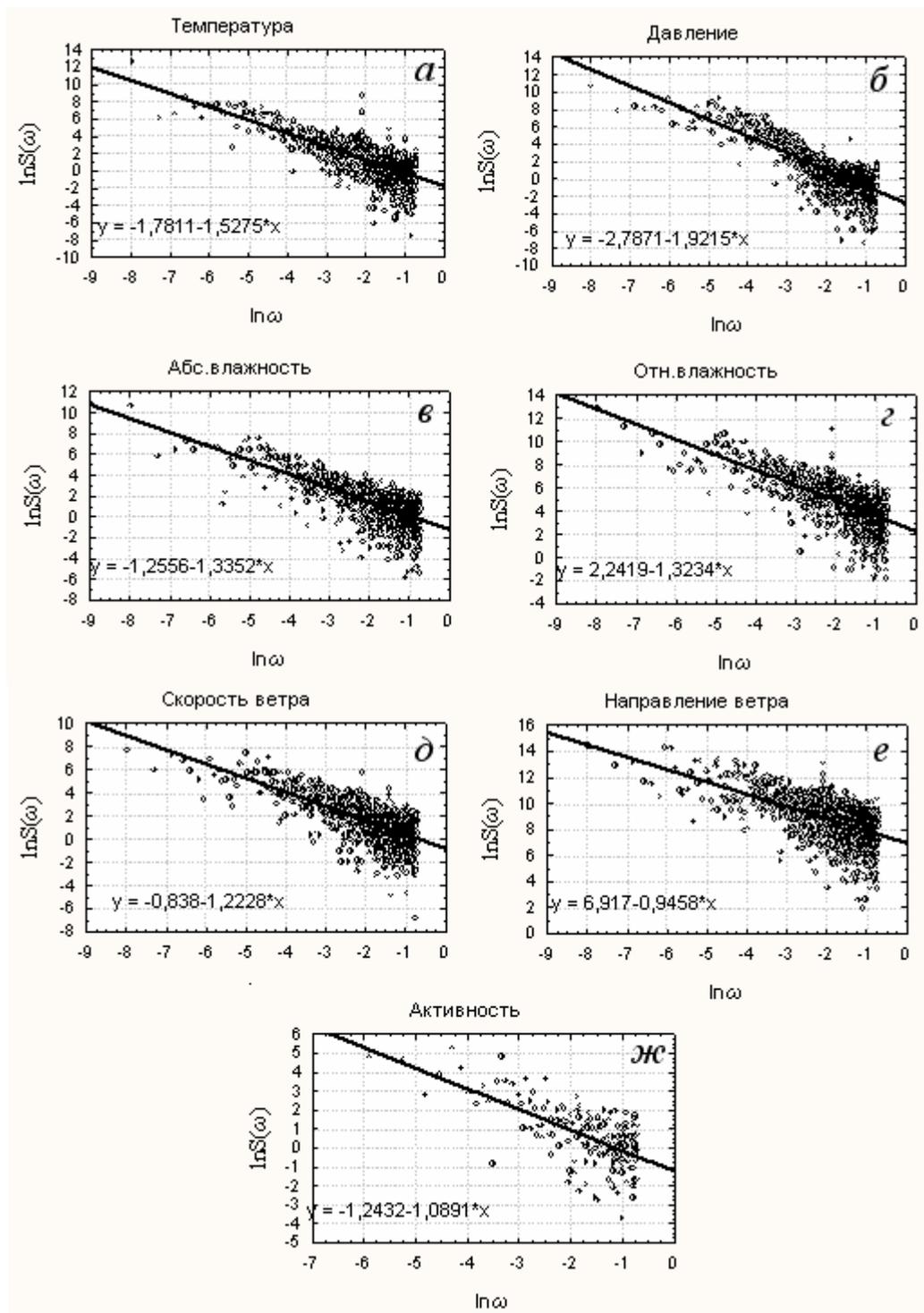
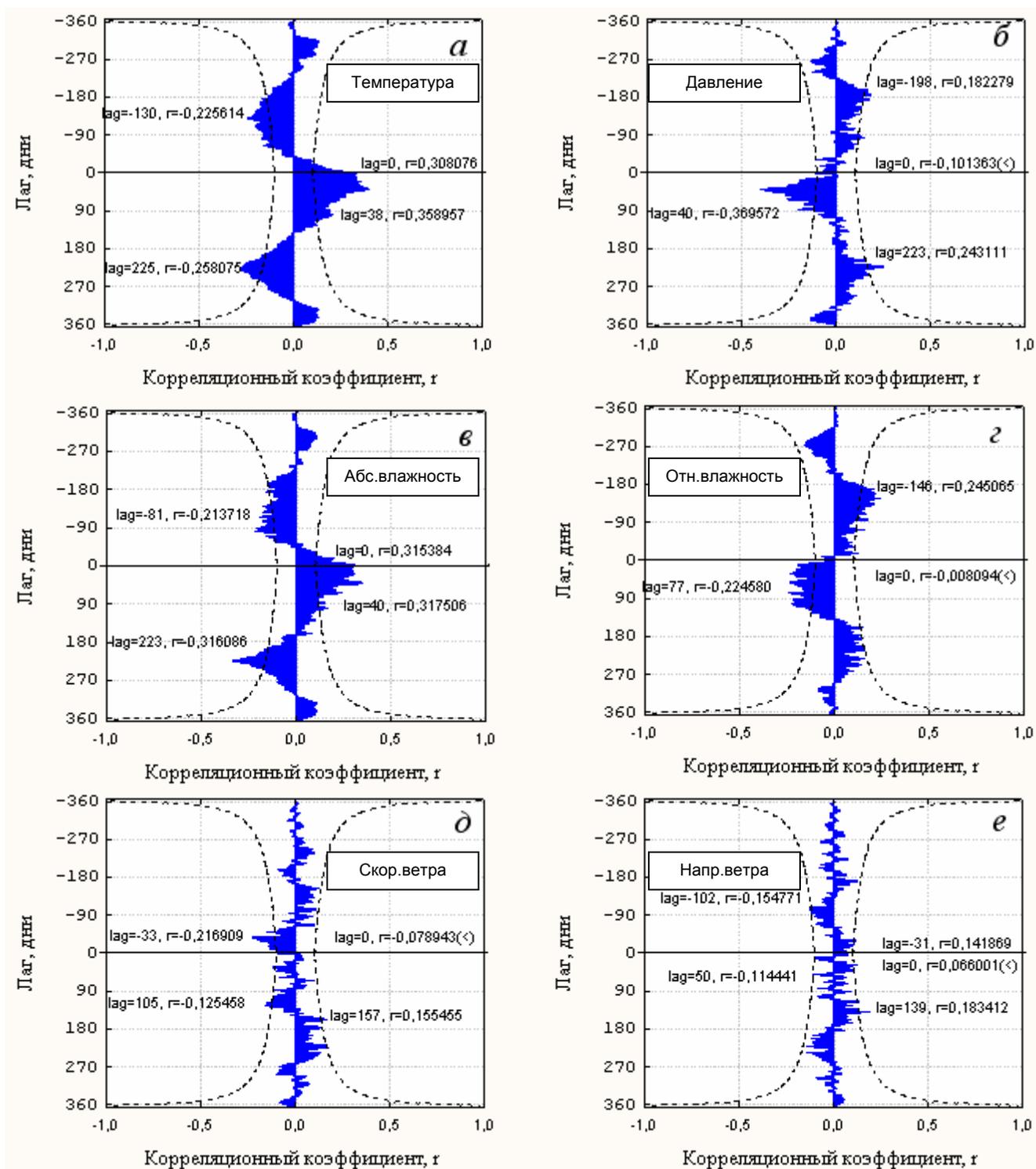


Рис.П.7 Кросскорреляционные функции климатических параметров от фона



ПРИЛОЖЕНИЯ

(таблицы)

Таблица П.1 Статистические характеристики распределений γ -фона в г. Мариуполе за 1988-2003 гг.

Параметр	Массив данных										
	1988-2003	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Размер выборки	5843	366	365	365	365	366	365	365	365	366	365
Среднее	13,5750	15,9921	15,4911	15,9637	15,0679	14,3623	13,1045	14,2539	14,1221	12,8275	11,1315
Медиана	14	15,75	15,17	15,6	15	14,33	13	14	14	13	11
Мода	14	15,5	14,5	14,5	15,5	14	13	14	14	12	12
Геометрическое среднее	13,4010	15,9063	15,4178	15,9028	15,0329	14,3299	13,0594	14,1695	14,0524	12,6606	10,9801
Дисперсия	4,5937	3,0541	2,3848	1,9749	1,0367	0,9193	1,1620	2,3719	1,9149	4,1018	3,4104
Стандартное отклонение	2,1433	1,7476	1,5443	1,4053	1,0182	0,9588	1,0779	1,5401	1,3838	2,0253	1,8467
Стандартная ошибка	0,0280	0,0913	0,0808	0,0736	0,0532	0,0501	0,0564	0,0806	0,0724	0,1059	0,0967
Минимум	7	12,5	12,5	13,5	11,5	11	10	10	10	7	7
Максимум	24,75	24,75	20	19	18	17	16,6	18	19	23	18
Интервал	17,75	12,25	7,5	5,5	6,5	6	6,6	8	9	16	11
Нижний квартиль	12	15,2	14,5	14,75	14,5	14	12,67	13	13,33	12	10
Верхний квартиль	15	16,5	16	17,25	15,66	15	13,93	15,33	15	14	12
Межквартильный интервал	3	1,3	1,5	2,5	1,16	1	1,26	2,33	1,67	2	2
Коэффициент асимметрии	0,0681	1,9097	0,8550	0,2972	-0,2504	-0,1528	-0,1674	-0,0638	-0,2456	0,0538	0,4336
Стандартная асимметрия	0,0320	0,1275	0,1277	0,1277	0,1277	0,1275	0,1277	0,1277	0,1277	0,1275	0,1277
Коэффициент эксцесса	0,4152	6,3412	0,2214	-1,0445	0,9863	0,4646	0,6476	-0,2673	0,3977	1,8668	0,6355
Стандартная крутизна в моде	0,0641	0,2544	0,2547	0,2547	0,2547	0,2544	0,2547	0,2547	0,2547	0,2544	0,2544

Таблица П.1 (продолжение).

Параметр	Массив данных					
	1998г	1999г	2000г	2001г	2002г	2003г
Размер выборки	365	365	366	365	365	365
Среднее	11,8422	12,1976	12,2971	12,9398	12,7999	12,8036
Медиана	12	12	12	13	13	12,67
Мода	12	14	12	12	14	12
Геометрическое среднее	11,7532	12,0865	12,1889	12,8312	12,6674	12,6557
Дисперсия	2,1125	2,6606	2,6371	2,8519	3,4069	3,8693
Стандартное отклонение	1,4535	1,6311	1,6239	1,6887	1,8458	1,9671
Стандартная ошибка	0,0761	0,0854	0,0849	0,0884	0,0966	0,1029
Минимум	8	8	8	9	9	9
Максимум	16	16	17	19	19	20
Интервал	8	8	9	10	10	11
Нижний квартиль	11	11	11	12	11	11
Верхний квартиль	13	14	13,5	14	14	14
Межквартильный интервал	2	3	2,5	2	3	3
Коэффициент асимметрии	0,1825	-0,0419	0,0654	0,3915	0,2376	0,4535
Стандартная асимметрия	0,1277	0,1277	0,1275	0,1277	0,1277	0,1277
Коэффициент эксцесса	-0,4772	-0,6877	-0,4669	0,2646	-0,3746	0,1939
Стандартная крутизна в моде	0,2547	0,2547	0,2544	0,2547	0,2547	0,2547

Таблица П.2 Статистические характеристики климатических параметров (8 измерений в сутки) и γ -фона (для 12ч) в г. Мариуполе за 1996 г.

Параметр	Массив данных								
	γ -фон, мкР/ч	Температура, °С							
		0ч	3ч	6ч	9ч	12ч	15ч	18ч	21ч
Размер выборки	366	366	366	366	366	366	366	366	366
Среднее	12,7989	8,6022	7,7197	7,1650	8,7115	10,3913	11,4366	11,0005	9,6325
Медиана	13	9	8,3	7,1	8,25	10,4	11,75	11,25	9,8
Мода	12	21	8,5	12,2	20,2	multiple	25	5,3	17
Геометрическое среднее	12,6396	-	-	-	-	-	-	-	-
Дисперсия	3,8191	114,9652	105,6702	103,5868	132,8191	138,5052	138,3588	137,4338	123,9947
Стандартное отклонение	1,9543	10,7222	10,2796	10,1778	11,5247	11,7688	11,7626	11,7232	11,1353
Стандартная ошибка	0,1022	0,5605	0,5373	0,5320	0,6024	0,6152	0,6148	0,6128	0,5821
Минимум	7	-16,2	-17,6	-18,6	-19	-14,1	-13	-14,4	-15,5
Максимум	19	30,5	28	27,2	30,8	34,5	35,7	34,6	34,6
Интервал	12	46,7	45,6	45,8	49,8	48,6	48,7	49	50,1
Нижний квартиль	12	0,4	0,4	0,0	-0,1	1,4	1,8	1,4	1,2
Верхний квартиль	14	17,4	16	15,3	18,9	20,6	21,8	21,2	19
Межквартильный интервал	2	17	15,6	15,3	19	19,2	20	19,8	17,8
Коэффициент асимметрии	-0,2848	-0,1756	-0,2179	-0,2442	-0,1723	-0,1063	-0,0671	-0,0822	-0,1421
Стандартная асимметрия	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275
Коэффициент эксцесса	0,5551	-0,7574	-0,7057	-0,7047	-0,9108	-0,9981	-0,9894	-0,9251	-0,7872
Стандартная крутизна в моде	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544

Таблица П.2 (продолжение).

Параметр	Массив данных							
	Атмосферное давление, мм рт. ст.							
	0ч	3ч	6ч	9ч	12ч	15ч	18ч	21ч
Размер выборки	366	366	366	366	366	366	366	366
Среднее	1017,347	1017,143	1017,137	1017,523	1017,468	1017,000	1016,840	1017,190
Медиана	1016,9	1016,6	1016,7	1017,2	1017,2	1016,45	1016,3	1016,55
Мода	1015,5	1017,3	1022,5	1022,7	1019,5	1016,4	multiple	multiple
Геометрическое среднее	1017,318	1017,112	1017,107	1017,493	1017,438	1016,972	1016,810	1017,161
Дисперсия	60,7411	61,8369	62,3039	61,5702	62,4686	58,5270	61,1837	60,3705
Стандартное отклонение	7,7937	7,8636	7,8933	7,8467	7,9037	7,6503	7,8219	7,7698
Стандартная ошибка	0,4074	0,4110	0,4156	0,4102	0,4131	0,3999	0,4089	0,4061
Минимум	995,8	995,4	995,9	996	995	995,3	996,3	996,5
Максимум	1039,6	1038,8	1038,1	1039	1038,9	1039	1039,2	1039,4
Интервал	43,8	43,4	42,2	43	43,9	43,7	42,9	42,9
Нижний квартиль	1012,2	1011,9	1012	1012,5	1012,4	1011,9	1011,3	1012
Верхний квартиль	1022,6	1022,5	1022,5	1022,7	1022,6	1022	1022	1022,3
Межквартильный интервал	10,4	10,6	10,5	10,2	10,2	10,1	10,7	10,3
Коэффициент асимметрии	0,0579	-0,0025	-0,0258	-0,0156	-0,0362	0,0350	0,0706	0,1117
Стандартная асимметрия	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275
Коэффициент эксцесса	0,1850	0,2791	0,1551	0,1508	0,1444	0,1174	0,0539	0,1023
Стандартная крутизна в моде	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544

Таблица П.2 (продолжение).

Параметр	Массив данных							
	Относительная влажность, %							
	0ч	3ч	6ч	9ч	12ч	15ч	18ч	21ч
Размер выборки	366	366	366	366	366	366	366	366
Среднее	73,9344	76,5246	78,4399	73,3142	68,4618	64,5301	66,0574	70,6066
Медиана	78,5	81	82	77	70	64,5	68	74
Мода	98	98	98	100	98	100	multiple	98
Геометрическое среднее	70,3994	73,5943	75,8527	69,9709	64,3085	59,7729	61,5345	66,6779
Дисперсия	435,3382	375,1706	341,2991	424,2544	486,7150	517,9265	508,5857	469,6420
Стандартное отклонение	20,8648	19,3693	18,4743	20,5974	22,0616	22,7580	22,5519	21,6712
Стандартная ошибка	1,0906	1,0125	0,9657	1,0766	1,1532	1,1896	1,1788	1,1328
Минимум	26	28	28	24	22	8	18	18
Максимум	100	100	100	100	100	100	100	100
Интервал	74	72	72	76	78	92	82	82
Нижний квартиль	60	63	65	57	52	46	49	52
Верхний квартиль	92	94	95	93	88	84	85	90
Межквартильный интервал	32	31	30	36	36	38	36	38
Коэффициент асимметрии	-0,5528	-0,6519	-0,7017	-0,4081	-0,267	-0,1667	-0,2357	-0,3778
Стандартная асимметрия	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275
Коэффициент эксцесса	-0,8847	-0,7032	-0,5633	-1,0647	-1,0504	-1,0306	-1,0689	-1,0422
Стандартная крутизна в моде	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544

Таблица П.2 (продолжение).

Параметр	Массив данных							
	Абсолютная влажность, %							
	0ч	3ч	6ч	9ч	12ч	15ч	18ч	21ч
Размер выборки	366	366	366	366	366	366	366	366
Среднее	9,1686	9,0530	8,8883	9,1574	9,4319	9,4142	9,2314	9,2533
Медиана	8,6	8,55	8,35	8,8	8,6	8,7	8,7	8,7
Мода	multiple	multiple	8	9	multiple	6	multiple	9,1
Геометрическое среднее	7,6353	7,5141	7,3499	7,5328	7,7906	7,8233	7,7169	7,7132
Дисперсия	26,1573	25,7457	25,6551	26,7917	29,1721	28,8704	26,0492	26,5376
Стандартное отклонение	5,1144	5,0740	5,0651	5,1761	5,4011	5,3731	5,1038	5,1515
Стандартная ошибка	0,2673	0,2652	0,2648	0,2706	0,2823	0,2809	0,2668	0,2693
Минимум	0,9	0,9	1	1	1,1	1	1	1
Максимум	25,5	25	24,9	25,7	26,9	30,2	25,7	25,4
Интервал	24,6	24,1	23,9	24,7	25,8	29,2	24,7	24,4
Нижний квартиль	4,9	4,7	4,6	4,8	5	5,2	5	5,1
Верхний квартиль	12	12	11,9	12,2	12,9	12,5	12,2	11,9
Межквартильный интервал	7,1	7,3	7,3	7,4	7,9	7,3	7,2	6,8
Коэффициент асимметрии	0,6645	0,6469	0,7165	0,5839	0,6755	0,7825	0,6633	0,6902
Стандартная асимметрия	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275
Коэффициент эксцесса	-0,0119	-0,0472	0,1455	-0,1485	-0,0948	0,3221	-0,0192	0,0488
Стандартная крутизна в моде	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544

Таблица П.2 (продолжение).

Параметр	Массив данных							
	Скорость ветра, м/с							
	0ч	3ч	6ч	9ч	12ч	15ч	18ч	21ч
Размер выборки	366	366	366	366	366	366	366	366
Среднее	5,7978	5,6667	5,7049	6,0109	6,6393	6,6011	6,0355	5,6612
Медиана	5	5	5	5	6	6	6	5
Мода	4	3	4	5	multiple	8	8	3
Геометрическое среднее	-	-	-	-	-	-	-	-
Дисперсия	9,9042	10,0858	10,2141	11,5560	11,4312	12,5473	12,4782	11,2931
Стандартное отклонение	3,1471	3,1758	3,1959	3,3994	3,3810	3,5422	3,5324	3,3605
Стандартная ошибка	0,1645	0,1660	0,1671	0,1777	0,1767	0,1852	0,1847	0,1757
Минимум	0	0	0	0	0	0	0	0
Максимум	16	16	18	18	18	20	17	16
Интервал	16	16	18	18	18	20	17	16
Нижний квартиль	3	3	3	3	4	4	3	3
Верхний квартиль	8	7	8	8	8	8	8	8
Межквартильный интервал	5	4	5	5	4	4	5	5
Коэффициент асимметрии	0,8297	0,7887	0,7912	0,6802	0,6647	0,6092	0,5585	0,6463
Стандартная асимметрия	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275
Коэффициент эксцесса	0,4042	0,4858	0,5651	0,4171	0,0326	0,3669	-0,1419	-0,0196
Стандартная крутизна в моде	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544	0,2544