

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С.В. Крюкова, Т.Е. Симакина

АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

Лабораторный практикум

РГГМУ
Санкт-Петербург
2018

УДК 504.3.054
ББК
К85

Рецензент: Г.Г. Шукин, профессор, д-р физ.-мат. наук, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Крюкова С.В., Симакина Т.Е.

Анализ загрязнения воздушного бассейна. Лабораторный практикум. – СПб.: РГГМУ, 2018. – 60 с.

Лабораторный практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Прикладная гидрометеорология» и «Гидрометеорология». Практикум содержит 10 работ и отражает тему «Анализа данных загрязнений», читаемую в рамках учебной дисциплины «Контроль загрязнений природной среды», а также способствует выработке навыков обработки временных числовых рядов, нормирования качества атмосферного воздуха, проведению статистического и геостатистического анализов.

ISBN 978-5-86813-459-3

© Крюкова С.В., Симакина Т.Е., 2018
© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2018

Введение

Лабораторный практикум «Анализ загрязнения воздушного бассейна» составлен в соответствии с программой дисциплины «Контроль загрязнений природной среды», читаемой студентам РГГМУ, обучающимся по направлениям подготовки «Прикладная гидрометеорология» и «Гидрометеорология».

В связи с динамичным развитием промышленности, автопарка сильно возросла потребность в подготовленных специалистах в области обработки данных экологического мониторинга. Настоящее пособие призвано заложить базовые основы знаний временного и пространственного анализа результатов наблюдений за загрязняющими веществами и основных приемов их компьютерного преобразования.

Теоретические сведения и практические задания, приводимые в учебном пособии, позволят студентам:

- познакомиться с основными загрязняющими веществами, присутствующими в воздушном бассейне крупного города на примере Санкт-Петербурга;
- научиться оценивать уровень загрязнения атмосферы;
- понять связь между метеорологическими характеристиками и уровнем загрязнения воздуха;
- освоить один из наиболее широко распространенных интерполяционных алгоритмов.

Пособие состоит из двух частей. Первая часть посвящена обработке временных рядов концентраций загрязняющих веществ (ЗВ). Вторая – пространственному анализу распределения ЗВ в воздушном бассейне Санкт-Петербурга. Практические работы по временному анализу выполняются в программе «Excel», по пространственному анализу – в программе «Surfer».

Исходным материалом для работ являются данные 20 автоматических станций мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Данные предоставлены Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности г. Санкт-Петербурга. Схема расположения станций показана на рис. 1.

Адреса расположения автоматических станций мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в г. Санкт-Петербург:

- № 1 – ул. Проф. Попова, д. 48;
- № 2 – г. Колпино, ул. Красная д. 1А;
- № 3 – ул. Карбышева, д. 7;
- № 4 – Малоохтинский пр., д. 98;
- № 5 – пр. Маршала Жукова, д. 30, корп. 3;
- № 6 – В.О. ул. Весельная, д. 6;
- № 7 – ул. Шпалерная, д. 56;
- № 8 – ул. Королева, д. 36, корп. 8;
- № 9 – Малая Балканская ул., д. 54;
- № 10 – Московский пр., д. 19;
- № 11 – г. Сестрорецк, ул. М. Горького, д. 2;
- № 12 – ул. Пестеля, д. 1;
- № 13 – шоссе Революции, д. 84;
- № 14 – г. Зеленогорск, пляж «Золотой», д. 1;
- № 15 – г. Кронштадт, ул. Ильмянинова, д. 4;
- № 16 – ул. Севастьянова, д. 11;
- № 17 – г. Пушкин, Тиньков пер., д. 4;
- № 18 – ул. Ольги Форш, д. 6;
- № 19 – пр. Маршала Жукова, д. 55;
- № 20 – ул. Тельмана, д. 24.

Данные по станциям наблюдения представлены в виде электронных таблиц «Excel». Фрагмент исходных данных за 1 января 2010 г. по станции № 4, расположенной по адресу Малоохтинский пр., д. 98 (территория РГГМУ), иллюстрирует табл. 1.

В первом столбце табл. 1 указана дата измерения в формате год – (xxxx), месяц – (xx), число – (xx) и время измерения в формате час – (xx): минута – (xx). Наблюдения проведены с интервалом в 20 мин. Строка заголовков таблицы содержит номер станции, адрес станции, наименование загрязняющих веществ и метеопараметров. Названия загрязняющих веществ написаны латинскими буквами, в скобках указаны единицы измерения концентраций загрязняющих веществ:

- CO – монооксид (оксид) углерода (мг/м³);
- NO – оксид азота (мкг/м³);
- NO₂ – диоксид азота (мкг/м³);
- SO₂ – диоксид серы (мкг/м³);
- NH₃ – аммиак (мкг/м³);
- PM₁₀ – взвешенные частицы, с размерами менее 10 мкм (мкг/м³);
- O₃ – озон (мкг/м³).

Названия метеорологических параметров написаны сокращенно по-английски:

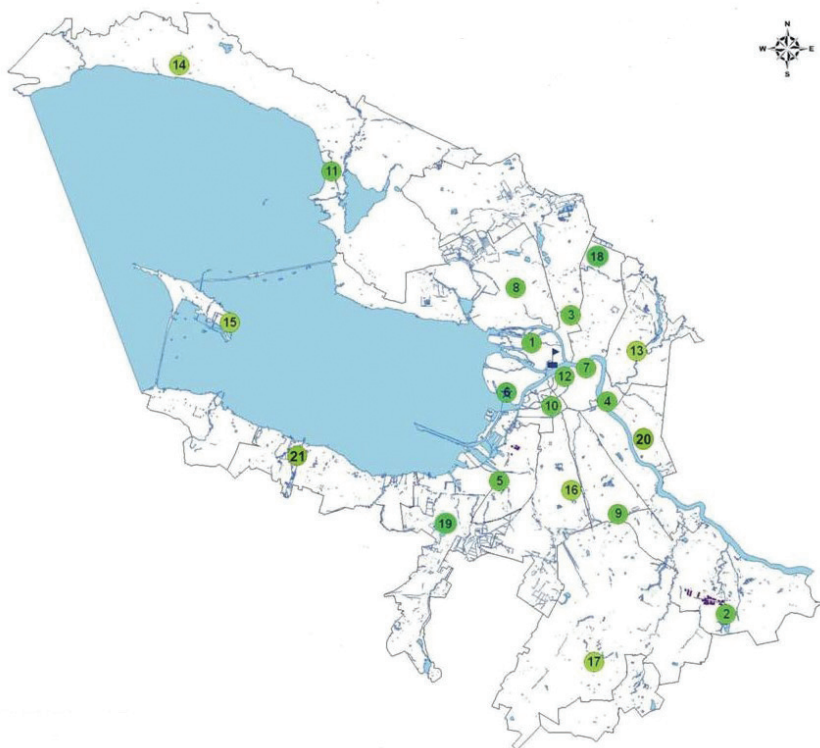


Рис. 1. Схема расположения станций

Таблица 1

Пример таблицы исходных данных

	A04 - Malookhtin sky pr. CO 002 [M] Value	A04 - Malookhtin sky pr. NO 002 [M] Value	A04 - Malookhtin sky pr. NO2 002 [M] Value	A04 - Malookhtin sky pr. NH3 002 [M] Value	A04 - Malookhtin sky pr. PM10 002 [M] Value	A04 - Malookhtin sky pr. Rel hum 002 [M] Value	A04 - Malookhtin sky pr. Temp 002 [M] Value	A04 - Malookhtin sky pr. Wind dir 002 [M] Value	A04 - Malookhtin sky pr. Wind spee 002 [M] Value
2010-01-01 00:00	0,40	34,86	24,15		14,85	76,74	-10,52	77,41	1,72
2010-01-01 00:20	0,40	34,17	23,25		15,40	76,80	-10,72	96,03	1,53
2010-01-01 00:40	0,40	35,09	23,26		17,60	76,93	-10,80	113,60	1,31
2010-01-01 01:00	0,40	34,54	22,01		24,50	76,84	-10,73	98,94	1,59
2010-01-01 01:20	0,26	35,28	22,28		41,55	76,62	-10,71	90,87	1,44
2010-01-01 01:40	0,40	35,42	23,33		40,15	76,19	-10,65	99,94	1,69
2010-01-01 02:00	0,42	37,67	26,57		39,50	76,49	-10,99	100,14	1,31
2010-01-01 02:20	0,42	38,47	25,74		37,55	77,06	-11,26	93,06	1,28
2010-01-01 02:40	0,43	40,13	27,08		34,95	76,99	-11,50	94,84	1,30
2010-01-01 03:00	0,42	38,75	26,64		28,95	76,73	-11,77	89,65	1,42
2010-01-01 03:20	0,44	38,46	26,57		24,90	76,66	-12,07	103,13	1,26
2010-01-01 03:40	0,43	40,50	27,12		24,05	76,59	-12,33	119,88	0,98
2010-01-01 04:00	0,42	35,58	24,33		25,25	76,72	-12,62	111,33	1,22
2010-01-01 04:20	0,42	36,69	24,72		22,40	76,60	-12,76	97,81	1,24
2010-01-01 04:40	0,43	38,21	26,49		23,45	76,40	-13,10	85,52	1,07

Rel hum (Relative humidity) – относительная влажность воздуха в процентах;

Temp (Temperature) – температура воздуха в °С;

Wind dir (Wind direction) – направление ветра в градусах;

Wind spee (Wind speed) – скорость ветра в м/с.

Для всех работ варианты выдаются преподавателем индивидуально.

По результатам работ представляются отчеты в виде презентации. Отчет должен включать в себя следующее:

1. Титульный лист (см. Приложение 1).
2. Цель работы.
3. Полученные графические и табличные данные (см. Приложение 4).
4. Анализ полученных результатов.
5. Выводы.

1. Анализ временных рядов концентрации загрязняющих веществ

Практическая работа № 1.1. Исследование суточных рядов концентрации загрязняющих веществ

Цель работы

Исследовать суточную динамику концентрации загрязняющих веществ.

Общие сведения

Загрязнение атмосферы представляет собой изменение состава атмосферы в результате наличия в ней примеси. Загрязняющим веществом называют примесь в атмосфере, оказывающую неблагоприятное действие на окружающую среду и здоровье населения.

Основные загрязняющие вещества

Диоксид серы, или сернистый ангидрид (SO_2) – наиболее широко распространенное соединение серы – бесцветный газ, образующийся при сгорании серосодержащих видов топлива (в первую очередь угля и тяжелых фракций нефти), а также при разных производственных процессах, например плавке сульфидных руд. У человека этот газ, легко растворяясь в слизи гортани и трахеи, вызывает раздражение верхних дыхательных путей.

Оксид углерода, или угарный газ (CO) – очень ядовитый газ без цвета, запаха и вкуса. Он образуется при неполном сгорании древесины, ископаемого топлива и табака, при сжигании твердых отходов и частичном анаэробном разложении органики. Примерно 50 % угарного газа образуется в связи с деятельностью человека, в основном в результате работы двигателей внутреннего сгорания автомобилей. В закрытом помещении (например, в гараже), наполненном угарным газом, снижается способность гемоглобина эритроцитов переносить кислород, из-за чего у человека замедляются реакции, ослабляется восприятие, появляются головная боль, сонливость, тошнота. Под воздействием большого количества угарного газа может произойти обморок, случиться кома и даже наступить смерть.

Взвешенные частицы (ПМ), включающие пыль, сажу, пыльцу и споры растений и пр., сильно различаются по размерам и составу. Они могут либо непосредственно содержаться в воздушной среде, либо быть заключены в капельках, взвешенных в воздухе (аэрозоли). В целом за год в атмосферу Земли поступает около 100 млн. т аэрозолей антропогенного происхождения. Примерно 50 % частиц антропогенного происхождения выбрасывается в воздух из-за неполного сгорания топлива на транспорте, заводах, фабриках и тепловых электростанциях. По данным Всемирной организации здравоохранения, 70 % населения, живущего в городах развивающихся стран, дышит сильно загрязненным воздухом, содержащим множество аэрозолей.

Оксиды азота. Оксид (NO) и диоксид (NO_2) азота образуются при сгорании топлива при очень высоких температурах (выше 650 °C) и избытке кислорода. В дальнейшем в атмосфере оксид азота окисляется до газообразного диоксида красно-бурого цвета, который хорошо заметен в атмосфере большинства крупных городов. Основными источниками диоксида азота в городах являются выхлопные газы автомобилей и выбросы тепловых электростанций. Кроме того, диоксид азота образуется при сжигании твердых отходов, так как этот процесс происходит при высоких температурах

горения. В значительных концентрациях диоксид азота имеет резкий сладковатый запах, раздражает нижний отдел дыхательной системы, особенно легочную ткань, ухудшая тем самым состояние людей, страдающих астмой, хроническими бронхитами и эмфиземой легких. Диоксид азота повышает предрасположенность к острым респираторным заболеваниям, например пневмонии.

Фотохимические окислители – озон (O_3), формальдегид являются продуктами вторичного загрязнения атмосферы в результате химических реакций под воздействием солнечной радиации. Озон образуется при расщеплении либо молекулы кислорода (O_2), либо диоксида азота (NO_2) с образованием атомарного кислорода (O), который затем присоединяется к другой молекуле кислорода. Хотя в стратосфере озон играет важную роль как защитный экран, поглощающий коротковолновую ультрафиолетовую радиацию, в тропосфере он как сильный окислитель разрушает растения, строительные материалы, резину и пластмассу. Озон имеет характерный запах, служащий признаком фотохимического смога. Вдыхание его человеком вызывает кашель, боль в груди, учащенное дыхание и раздражение глаз, носовой полости и гортани. Воздействие озона приводит также к ухудшению состояния больных хроническими астмой, бронхитами, эмфиземой легких и страдающих сердечнососудистыми заболеваниями.

Аммиак – бесцветный газ с резким запахом, хорошо растворяется в воде, спирте и ряде других органических растворителей. Синтезируют из азота и водорода. В природе образуется при разложении азотсодержащих органических соединений.

Основными источниками выделения аммиака являются предприятия по производству азотной кислоты и солей аммония, холодильные установки, коксохимические заводы и животноводческие фермы.

Аммиак – токсичный газ. При повышении концентрации в 100 раз (до 0,05 мг/л) проявляется раздражающее действие на слизистую оболочку глаз и верхних дыхательных путей, возможна даже рефлекторная остановка дыхания. Отравление аммиаком вызывает также сильное возбуждение, вплоть до буйного бреда, а последствия могут быть весьма тяжелыми – до снижения интеллекта и изменения личности.

Нормативы качества атмосферного воздуха

Особенностью нормирования качества атмосферного воздуха является зависимость воздействия загрязняющих веществ, присутствующих в воздухе, на здоровье населения не только от значения

их концентраций, но и от продолжительности временного интервала, в течение которого человек дышит данным воздухом. Поэтому в Российской Федерации, как и во всем мире, для загрязняющих веществ, установлены 2 норматива:

- норматив, рассчитанный на короткий период воздействия загрязняющих веществ. Данный норматив называется «предельно допустимые максимально – разовые концентрации»;

- норматив, рассчитанный на более продолжительный период воздействия (8 часов, сутки, по некоторым веществам год). В Российской Федерации данный норматив устанавливается для 24 часов и называется «предельно допустимые среднесуточные концентрации».

ПДК – предельная допустимая концентрация загрязняющего вещества в атмосферном воздухе – концентрация, не оказывающая в течение всей жизни прямого или косвенного неблагоприятного действия на настоящее или будущее поколение, не снижающая работоспособности человека, не ухудшающая его самочувствия и санитарно-бытовых условий жизни. Величины *ПДК* приведены в мг/м³ (ГН 2.1.6.695-98).

ПДК_{мр} – предельно допустимая максимальная разовая концентрация химического вещества в воздухе населенных мест, мг/м³. Эта концентрация при вдыхании в течение 20–30 мин не должна вызывать рефлекторных реакций в организме человека.

ПДК_{сс} – предельно допустимая среднесуточная концентрация химического вещества в воздухе населенных мест, мг/м³. Эта концентрация не должна оказывать на человека прямого или косвенного вредного воздействия при неопределенно долгом (годы) вдыхании.

В табл. 2 представлены предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в РФ.

Таблица 2

Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в РФ

N	Вещество	Класс опасности	<i>ПДК_{мр}</i> , мг/м ³	<i>ПДК_{сс}</i> , мг/м ³
1.	Оксид углерода	4	5	3
2.	Диоксид азота	2	0,2	0,04
3.	Оксид азота	3	0,4	0,06
4.	Диоксид серы	3	0,5	0,05
5.	Аммиак	4	0,2	0,04
6.	Озон	1	0,16	0,03
7.	Взвешенные вещества РМ ₁₀	3	0,3	0,06

Класс опасности – показатель, характеризующий степень опасности для человека веществ, загрязняющих атмосферный воздух. Вещества делятся на следующие классы опасности:

- 1 класс – чрезвычайно опасные;
- 2 класс – высоко опасные;
- 3 класс – опасные;
- 4 класс – умеренно опасные.

Задание

1. Построить графики изменения концентраций всех имеющихся загрязняющих веществ за заданные дни, определить наличие суточного хода.

2. Нанести на график значение среднесуточной ПДК_{сс} в виде горизонтальной линии для каждого из загрязняющих веществ. Сопоставить полученные графические данные с ПДК_{сс}.

3. Нанести на график значение ПДК_{мр} в виде горизонтальной линии для каждого загрязняющего вещества. Сравнить максимальные значения концентраций с соответствующими значениями ПДК_{мр}.

4. Проанализировать полученные данные, принимая во внимание адрес расположения станции, время суток, день недели, время года.

Практическая работа № 1.2. Исследование влияния метеорологических параметров на концентрацию загрязняющих веществ

Цель работы

Исследовать динамику суточного изменения основных метеопараметров и их влияние на концентрацию примесей в Санкт-Петербурге в разные времена года.

Общие сведения

Время сохранения примесей в атмосфере зависит от множества факторов, доминирующее значение среди которых принадлежит метеорологическим условиям. Под влиянием этих факторов при постоянных выбросах вредных веществ уровень загрязнения приземного слоя воздуха может колебаться в очень широких пределах.

Метеоусловия также влияют на перенос и рассеивание примесей в атмосфере. Наибольшее влияние оказывает режим ветра и температуры (температурная стратификация), осадки, туманы, солнечная радиация.

Ветер может по-разному влиять на процесс рассеивания примесей в зависимости от типа источника и характеристики выбросов. Если отходящие газы перегреты относительно окружающего воздуха, то они обладают начальной высотой подъема. В связи с этим вблизи источника создается поле вертикальных скоростей, способствующих подъему факела и уносу примесей вверх. Этот подъем обуславливает уменьшение концентраций примесей у земли. Концентрация убывает также и при очень сильных ветрах, однако это происходит за счет быстрого переноса примесей в горизонтальном направлении. При низких или холодных источниках выбросов повышенный уровень загрязнения воздуха наблюдается при слабых ветрах ($v = 0 \div 1$ м/с) вследствие скопления примесей в приземном слое. Прямое влияние на загрязнение воздуха в городе оказывает направление ветра. Существенное увеличение концентрации примеси наблюдается тогда, когда преобладают ветры со стороны промышленных объектов.

Инверсия температуры в атмосфере – повышение температуры воздуха с высотой вместо обычного для тропосферы её убывания. Инверсии температуры встречаются у земной поверхности (приземные инверсии) и в свободной атмосфере (приподнятые). Приземные инверсии температуры чаще всего образуются в безветренные ночи (зимой иногда и днём) в результате интенсивного излучения тепла земной поверхностью, что приводит к охлаждению как её самой, так и прилегающего слоя воздуха. Мощность приземных инверсий (ΔH) составляет десятки – сотни метров. Увеличение температуры в инверсионном слое – интенсивность инверсии (ΔT) – колеблется от десятых долей градусов до 15–20 °С и более.

Инверсии температуры являются задерживающими слоями в атмосфере; они препятствуют развитию вертикальных движений воздуха, вследствие чего под ними накапливаются водяной пар, пыль, ядра конденсации. Это благоприятствует образованию слоев дымки, тумана. Для состояния атмосферы в городах наибольшую опасность представляет приземная инверсия в сочетании со слабыми ветрами, т. е. ситуация «застоя воздуха».

Область распространения зимних инверсий совпадает с областью распространения антициклонов, поэтому при антициклонической погоде обычно наблюдаются высокие концентрации дыма.

Наиболее высокие концентрации загрязнений наблюдаются при низкой температуре. Рост влажности также способствует увеличению концентраций загрязнений в атмосферном воздухе. Капли тумана поглощают примесь, причем не только вблизи подстилающей поверхности, но и из вышележащих, наиболее загрязненных слоев воздуха. Вследствие этого концентрация примесей сильно возрастает в слое тумана и уменьшается над ним. Растворение сернистого газа в каплях приводит к образованию серной кислоты.

Осадки очищают воздух от примесей. После длительных интенсивных осадков высокие концентрации примесей в атмосфере практически не наблюдаются.

Солнечная радиация обуславливает фотохимические реакции в атмосфере с образованием различных вторичных продуктов, обладающих часто более токсичными свойствами, чем вещества, поступающие от источников выбросов.

Задание

1. Построить графики суточного хода метеорологических параметров за заданные дни. Составить краткий обзор погоды с использованием дополнительной информации об осадках, давлении, облачности. Метеорологические данные найти на интернет-сайтах погоды (например: pr5.ru, meteo.nw.ru и др.).

2. Сопоставить полученные данные с результатами работы № 1.1, проанализировать их, определить какой метеорологический параметр оказывает наибольшее влияние на загрязнение воздуха.

3. Определить наличие температурной инверсии (см. Приложение 2) в слое воздуха до 1 км и ее влияние на концентрацию ЗВ.

4. Построить графики распределения температуры с высотой, вставить в отчет фрагмент таблицы данных зондирования.

Практическая работа № 1.3. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха

Цель работы

Провести анализ статистических характеристик загрязнения атмосферы и оценить уровень загрязнения воздушного бассейна Санкт-Петербурга.

Общие сведения

Данные наблюдений за концентрациями примесей на стационарных и маршрутных постах (станциях) рассматриваются как совокупность единичных разовых показателей загрязнения атмосферы. На основании результатов наблюдений определяют уровень загрязнения атмосферы каждым загрязняющим веществом и суммарную оценку качества атмосферного воздуха в населенном пункте.

Для определения уровня загрязнения используются следующие статистические характеристики загрязнения атмосферы:

- средняя концентрация примеси в атмосфере $C_{\text{ср}}$, мг/м³ (мкг/м³);
- среднее квадратическое отклонение σ , мг/м³ (мкг/м³);
- максимальная разовая концентрация примеси C_m , мг/м³ (мкг/м³).

Качество атмосферного воздуха оценивается путем сравнения полученных значений средних и максимальных концентраций примесей с принятыми в России стандартами – предельно допустимыми концентрациями (ПДК). Средние концентрации за месяц и за год обычно сравниваются со среднесуточными ПДК. Концентрации, измеренные за 20 мин, сравниваются с максимальными разовыми ПДК.

Для оценки загрязнения атмосферы помимо перечисленных, также рассчитываются следующие характеристики: комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), наибольшая повторяемость (НП), стандартный индекс (СИ) и др.

ИЗА – комплексный индекс загрязнения атмосферы, учитывающий несколько примесей. Величина ИЗА рассчитывается по значениям среднегодовых концентраций, поэтому этот показатель характеризует уровень хронического, длительного загрязнения воздуха.

Его рассчитывают как сумму нормированных по ПДК и приведенных к концентрации диоксида серы средних содержаний различных веществ:

$$Y_n = \sum_{i=1}^n Y_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{\text{сред}_i}}{\text{ПДК}_{\text{с}_i}} \right)^{c_i},$$

где Y_i – единичный индекс загрязнения для i -ого вещества;

$C_{\text{сред}_i}$ – среднегодовая концентрация i -ого вещества;

$\text{ПДК}_{\text{с}_i}$ – $\text{ПДК}_{\text{с}_\text{с}}$ для i -ого вещества;

n – количество наименований примесей;

c_i – безразмерная константа приведения степени вредности i -ого вещества к вредности диоксида серы, зависящая от того, к какому классу опасности принадлежит загрязняющее вещество.

Класс опасности	1	2	3	4
Константа c_i	1,5	1,3	1,0	0,85

Для сопоставления данных о загрязненности несколькими веществами атмосферы разных городов или районов города комплексные индексы загрязнения атмосферы должны быть рассчитаны для одинакового количества (n) примесей. При составлении ежегодного списка городов с наибольшим уровнем загрязнения атмосферы для расчета комплексного индекса Y_n используют значения единичных индексов Y_i тех пяти веществ, у которых эти значения наибольшие. В большинстве регионов России к ним относятся взвешенные вещества, оксиды азота, диоксид серы, бенз(а)пирен, озон, формальдегид, фенолы, аммиак.

ИЗА определяет, какому уровню загрязнения атмосферы соответствуют фактически наблюдаемые концентрации пяти загрязняющих веществ в городской атмосфере, т.е. показывает, во сколько раз суммарный уровень загрязнения атмосферы превышает допустимое значение по рассматриваемой совокупности примесей в целом.

НП – наибольшая повторяемость превышения ПДК – процент превышения ПДК любым ЗВ в городе – определяется как наибольшее из всех значений повторяемости превышения ПДК по данным измерений на всех постах (станциях) за одной примесью, или на всех постах (станциях) за всеми примесями, соответственно, за месяц или год.

СИ – стандартный индекс – наибольшая измеренная разовая концентрация примеси, деленная на ПДК; она определяется из данных наблюдений на посту за одной примесью или на всех постах за всеми примесями (в соответствии с РД 52.04.667-2005).

Оценка степени загрязнения атмосферы в целом по городу выполняется при условии наличия измерений за концентрациями не менее пяти примесей и количестве наблюдений не менее 500 за каждой примесью за год. Если эти условия не выполняются, оценка считается ориентировочной. Уровень загрязнения воздуха характеризуется четырьмя стандартными градациями показателей СИ, НП и ИЗА.

Степень загрязнения атмосферы за сутки оценивается по значениям СИ, за месяц – по значениям СИ и НП в соответствии с табл. 3. Если СИ и НП попадают в разные градации, то степень загрязнения атмосферы оценивается по наибольшему значению из этих показателей. Степень загрязнения атмосферы за год оценивается по трем показателям, причем, если ИЗА, СИ и НП попадают в разные градации, то степень загрязнения атмосферы оценивается по ИЗА.

Таблица 3

Оценки степени загрязнения атмосферного воздуха

Градация/Уровень загрязнения воздуха	Показатели загрязнения атмосферы	Оценки за		
		сутки	месяц	год
I низкое (загрязнение)	СИ	0–1	0–1	0–1
	НП	–	0	0
	ИЗА	–	–	0–4
II повышенное	СИ	2–4	2–4	2–4
	НП	–	1–19	1–19
	ИЗА	–	–	5–6
III высокое	СИ	5–10	5–10	5–10
	НП	–	20–49	20–49
	ИЗА	–	–	7–13
IV очень высокое	СИ	> 10	> 10	> 10
	НП	–	> 50	> 50
	ИЗА	–	–	≥ 14

В случае одновременного присутствия в воздухе веществ, обладающих суммированным действием, сумма их концентраций, нормированная на ПДК, не должна превышать единицы:

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1.$$

К вредным веществам, обладающим суммацией действия, относятся, как правило, близкие по химическому строению и характеру влияния на организм человека, например:

- озон – диоксид азота – формальдегид;
- оксид углерода – диоксид азота – формальдегид – гексан;
- диоксид серы – оксид углерода – диоксид азота – фенол;
- диоксид азота и диоксид серы.

Вместе с тем многие вещества при одновременном присутствии в атмосферном воздухе не обладают суммацией действия, т.е. предельно допустимые значения концентраций сохраняются для каждого вещества в отдельности, например: оксид углерода и диоксид серы; оксид углерода, диоксид азота и диоксид серы.

Задание

1. Рассчитать статистические характеристики временных рядов концентрации ЗВ (см. Примечание) и заполнить таблицу. Сравнить соответствующие характеристики с ПДК_{сс} и ПДК_{мр}.

Таблица 4

Статистические характеристики концентраций ЗВ

Характеристики \ ЗВ	ЗВ ₁	ЗВ ₂	
Среднее			
Медиана			
Мода			
Стандартное отклонение			
Минимум			
Максимум			

2. Построить гистограммы для всех ЗВ и проанализировать их.
3. Рассчитать ИЗА, сравнить с нормами, сделать вывод об уровне загрязнения.
4. Рассчитать суммацию для однонаправленных веществ, построить график зависимости $\sum \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}$ от времени, нанести на график $\sum \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} = 1$.
5. Рассчитать стандартный индекс (СИ).
6. Проанализировать полученные данные и сделать вывод об уровне загрязнения воздуха.

Примечание: статистические характеристики можно вычислить с помощью инструмента анализа «Описательная статистика» из пакета «Анализ данных» в Excel (см. Приложение 3).

Практическая работа № 1.4.

Корреляционный анализ концентраций загрязняющих веществ и метеопараметров

Цель работы

Провести корреляционный анализ концентрации загрязняющих веществ и метеорологических параметров.

Общие сведения

Корреляционный анализ – это проверка гипотез о связях между переменными с использованием коэффициентов корреляции. Коэффициент корреляции – количественная мера совместной изменчивости двух переменных.

Основное назначение корреляционного анализа – выявление корреляционной связи между двумя или более изучаемыми переменными. Корреляционная связь это совместное согласованное изменение двух изучаемых характеристик. Наглядное представление о характере вероятностной связи дает диаграмма рассеивания (рис. 2) – математическая диаграмма, изображающая значения двух переменных в виде точек на декартовой плоскости.

Значения коэффициентов корреляции r изменяются в диапазоне от -1 до $+1$. При отрицательной корреляции увеличение одной переменной связано с уменьшением другой; при положительной корреляция наоборот – увеличение одной переменной сопровождается ростом другой переменной.

Корреляционная матрица. Если необходимо рассчитать коэффициенты корреляции для нескольких переменных (больше двух) во всех сочетаниях друг с другом, то набор получившихся коэффициентов корреляции можно оформить в виде матрицы, которая называется *корреляционной*.

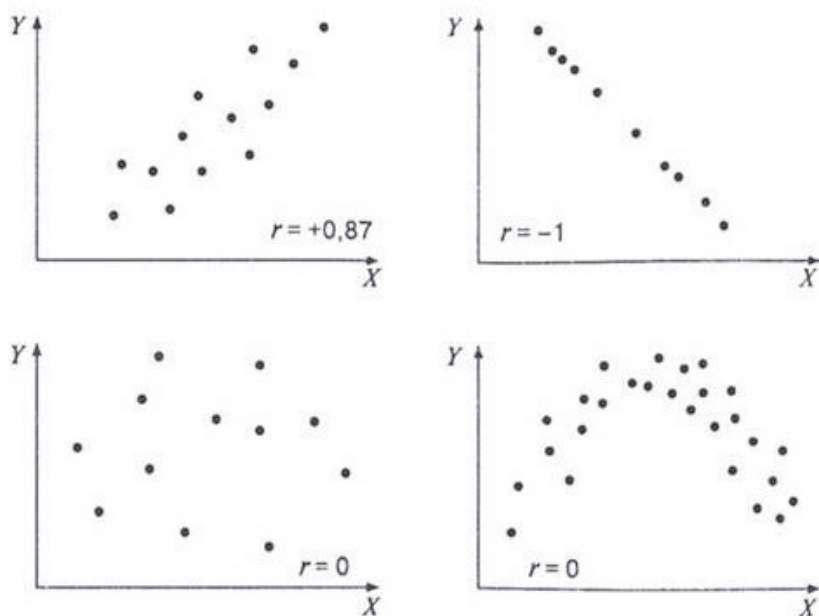


Рис. 2. Примеры диаграмм рассеивания и соответствующих коэффициентов корреляции r

Например, для четырех переменных A, B, C, D – 16 коэффициентов корреляции собираются в корреляционную матрицу:

	A	B	C	D
A	1.0	r_{12}	r_{13}	r_{14}
B	r_{21}	1.0	r_{23}	r_{24}
C	r_{31}	r_{32}	1.0	r_{34}
D	r_{41}	r_{42}	r_{43}	1.0

Если при $r = 0$ статистическая связь отсутствует, то при $|r| = 1$ статистическая связь максимальна. Для промежуточных значений r может характеризовать как отсутствие связи, так и ее значительную величину. Чтобы это определить однозначно, необходимо выполнить *проверку коэффициента корреляции на значимость*.

Для этого сформулируем нулевую гипотезу $H_0: r = 0$ и альтернативную $H_1: r \neq 0$.

Для проверки этой гипотезы выбирается критерий Стьюдента, выборочное значение которого рассчитывается по формуле:

$$t^* = \frac{r}{\sigma_r},$$

где σ_r – стандартное отклонение для распределения коэффициентов корреляции генеральной совокупности:

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{N - 1}},$$

Далее определяется критическое значение $t_{кр}(\alpha, \nu)$, где уровень значимости α принимается равным 5 %, а число степеней свободы $\nu = N - 1$, где N – длина ряда (концентрации ЗВ и метеопараметры), $t_{кр}$ можно рассчитать с помощью статистической функции Excel – «СТЮДРАСПОБР».

Сравниваем t^* по модулю с $t_{кр}$.

Если $|t^*| > t_{кр}$, нулевая гипотеза отвергается, коэффициент корреляции значим, т.е. между двумя переменными существует статистически значимая прямая (или обратная, в зависимости от знака) связь.

Если $|t^*| < t_{кр}$, нулевая гипотеза принимается, коэффициент корреляции незначим, т.е. между двумя переменными статистически значимая связь отсутствует.

Значения коэффициентов корреляции интерпретируются согласно табл. 5.

Таблица 5

Интерпретация коэффициентов корреляции

Значение коэффициента корреляции $ r $	Интерпретация
до 0,2	очень слабая корреляция
до 0,5	слабая корреляция
до 0,7	средняя корреляция
до 0,9	высокая корреляция
свыше 0,9	очень высокая корреляция

Задание

1. Вычислить коэффициенты корреляции: между самими загрязняющими веществами, между загрязняющими веществами и метеопараметрами, а также между самими метеопараметрами (см. Приложение 3).

2. Значения коэффициентов корреляции округлить до сотых, отредактировать шапку таблицы. Ниже представлен фрагмент отредактированной корреляционной матрицы, полученной в «Excel»:

	CO	NO	NO ₂	...
CO	1			
NO	0,89	1		
NO ₂	0,80	0,81	1	
...	...	...	...	1

3. Проверить на значимость все полученные коэффициенты корреляции. Заполненную таблицу вставить в презентацию (пример заполнения таблицы представлен в табл. 6).

Таблица 6

Значения коэффициентов корреляции

№	Сравниваемые переменные	Значение коэффициента корреляции r	σ_r	t^*	$t_{кр}$	Вывод: значимый или незначимый
1	NO-CO	0.89	0,0245	36,324	1,99	значимый
2	PM10-CO	0,08	0,1171	0,6831	1,99	незначимый

4. Выделить цветом или шрифтом значимые коэффициенты корреляции в корреляционной матрице и проанализировать полученную корреляционную матрицу (см. Приложение 4.3). Отредактированную корреляционную матрицу вставить в презентацию.

5. На основе анализа корреляционной матрицы сделать вывод о взаимозависимости переменных, пользуясь табл. 5.
6. Построить три диаграммы рассеивания для переменных:
 - с наибольшим значимым положительным коэффициентом корреляции;
 - с наибольшим значимым отрицательным коэффициентом корреляции;
 - с наименьшим по модулю значимым коэффициентом корреляции.
7. Проанализировать полученные данные.

Практическая работа № 1.5.

Анализ недельных временных рядов концентрации загрязняющих веществ

Цель работы

Исследовать недельный ход временных рядов концентрации примесей за заданный период.

Задание

1. Построить графики распределения концентрации загрязняющих веществ за заданный период времени. Определить наличие недельного хода.
2. Найти среднесуточные значения концентрации ЗВ (см. Примечание) и построить графики среднесуточных концентраций за 2 недели. Сопоставить со среднесуточной ПДК_{сс}.
3. Найти максимальные суточные значения концентрации ЗВ и построить графики максимальных концентраций за 2 недели. Сопоставить с максимально-разовой ПДК_{мр}.
4. Заполнить таблицу (пример заполнения в табл. 7), внося в нее найденные максимальные и минимальные значения концентраций за 2 недели, указать исследуемый временной интервал, номер и адрес станции наблюдения. Проанализировать таблицу.
5. Построить графики всех измеряемых на станции метеорологических параметров за аналогичный период времени.
6. Выполнить анализ осадков и облачности за аналогичный период. Метеорологические данные найти на интернет-сайтах погоды (например: gr5.ru, meteo.nw.ru и др.).
7. Определить метеорологический параметр, оказывающий наибольшее влияние на загрязнение воздуха.

Максимальные и минимальные концентрации ЗВ

ЗВ	ПДК		Число дней		Максимальная концентрация ЗВ, дата, день недели, время, скорость и направление ветра	Минимальная концентрация ЗВ, дата, день недели, время, скорость и направление ветра
	ПДК _{мр}	ПДК _{сс}	всего	выше ПДК _{мр}		
СО	5	3			2,57 мг/м ³ , 15.01 (пятн.), 17:40, 0,32 м/с, 172 (Ю)	0,18 мг/м ³ , 15.01 (пятн.), 01:20, 0,91 м/с, 117 (В-ЮВ)
NO						
...						

Примечание: средние, максимальные и минимальные значения концентраций можно найти с помощью инструмента анализа «Описательная статистика» из пакета «Анализ данных» в «Excel».

Практическая работа № 1.6.

Исследование влияния температурных инверсий на загрязнение атмосферного воздуха

Цель работы

Исследовать влияние температурных инверсий на уровень загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге.

Основные сведения

В результате хозяйственной деятельности человека в атмосфере появляется большое количество загрязняющих веществ, что наиболее характерно для крупных городов. Резкое возрастание концентраций загрязняющих веществ происходит в период возникновения неблагоприятных метеорологических условий, способствующих накоплению промышленных и автомобильных выбросов в нижних слоях атмосферы. К таким неблагоприятным условиям относится инверсия, представляющая собой задерживающий слой теплого воздуха, который препятствует рассеиванию примесей по вертикали.

Инверсии возникают под воздействием радиационных и адвективных факторов, кроме того, рельеф местности, крупные водоемы и парки создают дополнительные условия для их образования. Инверсия усиливается в глубоких впадинах, котловинах, обрывах, долинах рек. Холодный воздух опускается и подтекает под теплый воздух, образуя «озеро холода».

Главными характеристиками инверсий температуры является их мощность, интенсивность и температурный градиент. *Мощность инверсии* (ΔH) определяют по разнице между верхней и нижней границами инверсии, выраженной в метрах. *Интенсивность инверсии* (ΔT) – это разница температур на ее границах в °С.

Вертикальный температурный градиент (γ) – изменение температуры с ростом высоты над уровнем моря, взятое на единицу расстояния. Считается положительным, если температура с высотой падает. В обратном случае, когда температура при подъеме повышается, образуется обратный (инверсионный) вертикальный градиент, которому присваивается знак минус. В тропосфере вертикальный температурный градиент в среднем составляет 0,65 °С/100 м. В теплое время года, когда близкий к поверхности земли слой воздуха достаточно нагрет, может наблюдаться понижение температуры с высотой, превышающее 1 °С на каждые 100 м подъема. Зимой, при сильном охлаждении поверхности земли и приземного слоя воздуха, температура часто не понижается, а растет с высотой, т. е. возникает инверсия температуры. Подобные слои воздуха имеются в любое время года и на различных высотах.

Задание

1. Определить наличие инверсий за указанный в варианте период времени (см. Приложение 2).

2. Вычислить параметры ночных и дневных инверсий: мощность, интенсивность и вертикальный температурный градиент. Характеристики инверсий и результаты вычислений поместить в таблицы (см. примеры заполнения – табл. 8 и 9).

Таблица 8

Пример таблицы
характеристик инверсий по данным станции Воейково в срок 04:00

Дата	Высота НГ инверсии, м	Мощность инверсии, м	Интен- сивность инверсии по модулю, °С	Температура НГ инвер- сии, °С	Вертикальный градиент тем- пературы, °С /100 м
01.01.2010	78	505	1,4	–14,3	–0,28
02.01.2010	190	1210	1,1	–16,4	–0,12
03.01.2010	693	216	4,8	–17,1	–2,22
...	...	...	...	...	...

Таблица 9

Пример таблицы
характеристик инверсий по данным станции Воейково в срок 16:00

Дата	Высота НГ инвер- сии, м	Мощность инверсии, м	Интен- сивность инверсии по модулю, °С	Температура НГ инвер- сии, °С	Вертикальный градиент тем- пературы, °С /100 м
01.01.2010	936	276	1	-16,9	-0,36
02.01.2010	695	249	3,6	-16,5	-1,45
03.01.2010	470	423	1,8	-16,7	-0,43
...	...	...	...	...	...

3. Определить количественные характеристики инверсий, заполнить итоговую таблицу, проанализировать.

Таблица 10

Количественные характеристики инверсий

Количество инверсий	1-я неделя		2-я неделя	
	ночные	дневные	ночные	дневные
Количество приземных / высотных инверсий				
Максимальная / средняя мощность инверсии в метрах				
Максимальная интенсивность инверсии в °С, дата				

4. Построить вертикальные профили температуры для наибольших по модулю градиентов по данным зондирования за оба срока.

5. Построить графики временных рядов мощности, интенсивности и высоты нижней границы (НГ) ночной и/или дневной инверсии за указанный период времени в виде столбчатой диаграммы (см. Приложение 4.5). Проанализировать все характеристики инверсии.

6. Определить влияние температурной инверсии на уровень концентраций различных загрязняющих веществ в воздухе Санкт-Петербурга, сравнив построенные графики с результатами работы № 1.5.

7. Провести корреляционный анализ значений ЗВ и характеристик инверсии. Для этого выполнить следующее.

7.1. На основе данных работы № 1.5 вычислить средние полусуточные (с 04 ч до 16 ч и с 16 ч до 04 ч) значения концентраций ЗВ и занести их в табл. 11 и 12 (ниже см. пример заполнения таблиц).

Таблицы 11 и 12

Средние полусуточные значения концентраций ЗВ

с 04 ч до 16 ч	CO	NO	NO ₂	с 16 ч до 04 ч	CO	NO	NO ₂
01.январь	0,44	38,21	25,23	01.январь	0,63	60,40	33,34
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
14.январь	0,81	115,10	50,49	14.январь	0,58	65,10	44,31

7.2. Вычислить коэффициенты корреляции между средними полусуточными концентрациями ЗВ и мощностью, интенсивностью, высотой нижней границы инверсий и температурным градиентом в сроки наблюдений 04 ч и 16 ч. Методика вычисления коэффициентов корреляции в «Excel» приведена в работе № 1.4. На значимость проверить только коэффициенты корреляции между концентрациями ЗВ и характеристиками инверсии.

7.3. Построить диаграммы рассеивания для двух пар переменных, имеющих наибольшие коэффициенты корреляции с разными знаками.

7.4. Проанализировать полученные результаты.

2. Анализ пространственного распределения концентрации загрязняющих веществ

Практическая работа № 2.1. Анализ пространственной корреляции

Цель работы

Исследовать пространственную корреляцию ЗВ.

Общие сведения

Основным инструментом пространственного анализа является вариограмма, которая используется для установления пространственной корреляции между измерениями. Вариограмма – мера степени пространственной зависимости между значениями концентраций в заданном направлении – определяется формулой:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2.$$

Графически вариограмма представляет собой зависимость $\gamma(h)$ от расстояний между точками $Z(x_i)$ и $Z(x_i + h)$, называемых лагами – рис. 3. Когда лаг равен 0, то и значение вариограммы равно 0. По мере увеличения лага сравниваемые концентрации становятся все менее похожими друг на друга, в конце концов, значение вариограммы достигнет плоской области – порога. Расстояние, на котором кривая вариограммы приближается к порогу, называется рангом или зоной влияния. Это расстояние определяет окрестность, в пределах которой все значения исследуемого компонента связаны друг с другом. Для стационарных переменных значение вариограммы на расстоянии больше зоны влияния эквивалентно дисперсии.

На рис. 4 отражены типы поведения вариограммы при малых лагах.

1. *Квадратичный* (рис. 4-а). Этот тип беспороговой вариограммы показывает, что пространственная переменная имеет высокую непрерывность, а функция дифференцируема. Квадратичная форма обычно указывает на наличие сильного тренда в измерениях.



Рис. 3. Вариограмма

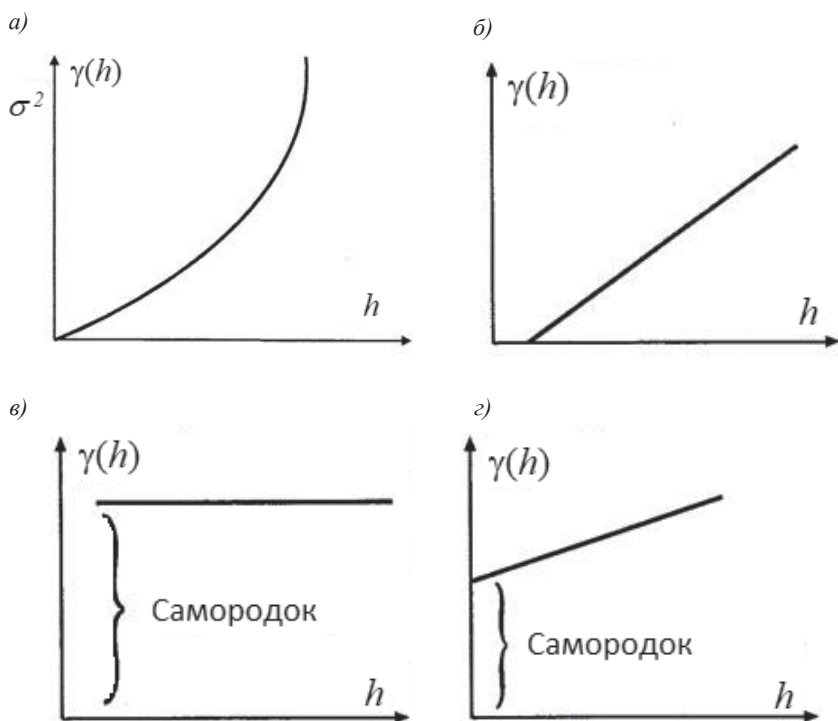


Рис. 4. Поведение вариограмм около начала координат
а) квадратичная форма; б) линейное поведение; в), г) разрыв в начале

2. *Линейный* (рис. 4-б). Пространственная переменная непрерывна, но не дифференцируема и, таким образом, менее регулярная (непрерывная), чем предыдущая.

3. *С разрывом в начале* (рис. 4-в). Функция не стремится к нулю при нулевых лагах, что означает нерегулярность переменной на малых расстояниях. Такое явление называется эффектом самородков.

4. *Плоский* (рис. 4-г). Случайная функция или «белый» шум. Пространственные переменные $Z(x_i)$ и $Z(x_i + h)$ не коррелируют для всех значений лагов. Это предельный случай отсутствия какой-либо структуры, называемый чистым эффектом самородков. Такая структура может возникнуть при больших расстояниях между точками измерений. Если вариограмма представляет собой чистый эффект самородков, то есть между концентрациями отсутствует корреляционная связь, применение интерполяции с помощью кригинга не имеет смысла, интерполяцию в этом случае выполняют другими методами.

При достижении вариограммой порога, в этой области иногда наблюдается так называемый «эффект включений» – рис. 5, который говорит о зональности в данных или о недостаточном их количестве. Эффект включений характеризуется относительной амплитудой, определяемой отношением максимального значения вариограммы (на гребне) к ее порогу.

Изменение кривизны вариограммы в зоне влияния говорит о наличии вложенных структур. Вложенные структуры указывают на процессы, происходящие в различных масштабах. На рис. 6 более длинная зона влияния является вложенной дополнительной структурой.

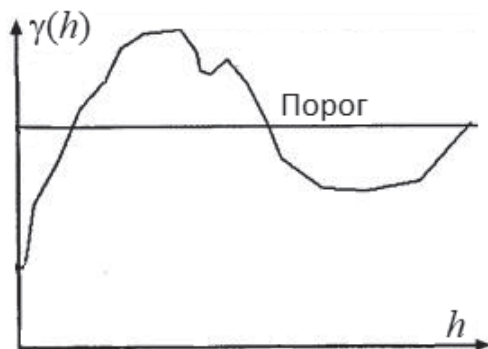


Рис. 5. Эффект включений на вариограмме

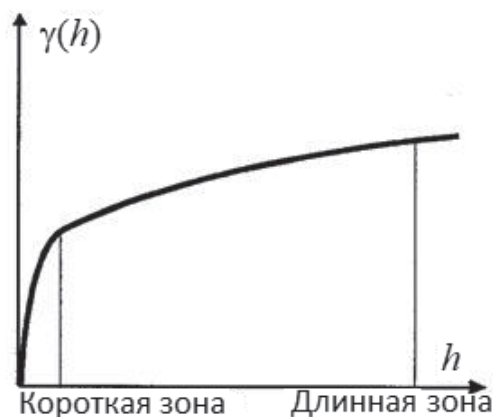


Рис. 6. Вложенная структура, составленная из структур с короткой и длинной зонами влияния

Если вариограмма меняется от направления, то это говорит о наличии анизотропии – различии концентрации ЗВ в разных направлениях. Например, на рис. 7 вариограммы в двух направлениях имеют одинаковый порог, но различные зоны влияния.

Подбор моделей вариограмм. Экспериментальную вариограмму сложно использовать для интерполяции, так как значения функции даются только в точках вариограммы, а для решения интерполяционных задач необходима информация о значениях вариограммы в любых ее точках. Поэтому дискретная экспериментальная вариограмма должна быть аппроксимирована непрерывной функцией.

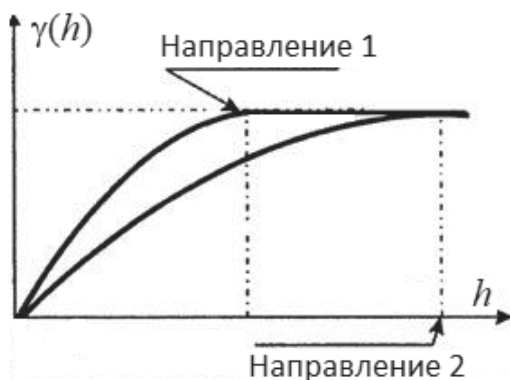


Рис. 7. Пример анизотропии

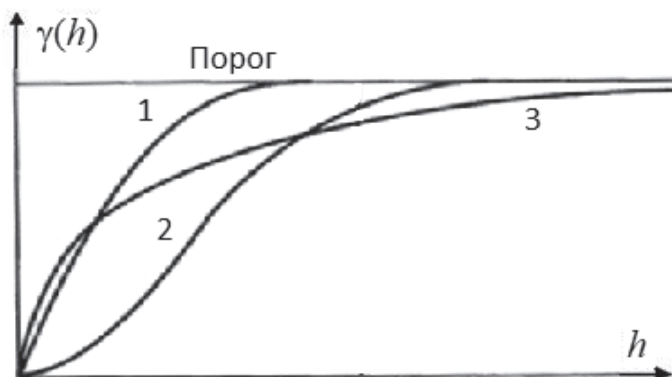


Рис. 8. Пороговые модели вариограмм:
1 – сферическая, 2 – Гаусса, 3 – экспоненциальная

Наибольшее распространение получили сферическая, экспоненциальная, модель Гаусса (рис. 8) и беспороговые модели – линейная и логарифмическая модель.

Сферической моделью может быть аппроксимировано более 80 % всех вариограмм, и эта модель имеет линейное поведение в начале координат и порог обычно равный дисперсии. Касательная, проведенная к этой функции от начала координат пересекает линию порога на расстоянии двух зон влияния, деленной на три. Экспоненциальная модель похожа на сферическую модель, она достигает порога на расстоянии трех зон влияния. Модель Гаусса имеет параболическое поведение в начале координат, на практике используется реже.

Задание

Работа выполняется с помощью программного пакета «Surfer» (см. Приложение 5).

1. Подготовить таблицу исходных данных по всем станциям наблюдения.

Таблица 13

Пример таблицы исходных данных по всем станциям наблюдения

№ станции	Концентрации загрязняющих веществ				
	CO	NO	NO ₂	...	...
1					
...					
20					

2. Построить вариограммы трех ЗВ – CO, NO, NO₂.
3. Подобрать кривые, аппроксимирующие экспериментальные точки.
4. Проанализировать полученные вариограммы и их свойства (поведение в зоне влияния, эффект самородков, сравнение дисперсии с порогом, анизотропия).

Практическая работа № 2.2.

Интерполяция концентраций ЗВ на территорию Санкт-Петербурга методом кригинга

Цель работы

Построить пространственное распределение загрязняющих веществ в Санкт-Петербурге по данным всех станций наблюдения методом кригинга.

Основные сведения

Метод кригинга в настоящее время стал фундаментальным инструментом в области геостатистики. В нем учитывается не только удаленность точек, но и их взаимное расположение. Кригинг – многошаговый процесс, состоящий из статистического анализа исходных данных, оценки пространственной структуры на основе пространственной корреляционной или структурной функции и создания интерполирующей поверхности.

Метод ординарного кригинга основан на формуле:

$$Z = w_i \cdot Z(x_i),$$

где $Z(x_i)$ – измеренное значение в точке i : $Z(i) = \bar{Z} + \varepsilon(i)$, w_i – весовое значение для i -й точки; $\bar{Z}$ – постоянное среднее значение; $\varepsilon(i)$ – стандартная случайная ошибка исходных данных.

Веса w_i находят из следующего выражения:

$$w = \begin{pmatrix} \gamma(h_{11}) & \dots & \gamma(h_{1n}) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma(h_{n1}) & \dots & \gamma(h_{nn}) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \gamma(h_{01}) \\ \dots \\ \gamma(h_{0n}) \\ 1 \end{pmatrix},$$

где h_{ij} – расстояние между i -й и j -й точками, попавшими в поисковый круг;

функция $\gamma(h_{ij})$ – есть экспериментальная (модельная) вариограмма, которая учитывает тот факт, что значения переменной в близко расположенных точках пространственно коррелированы, в то время как в удаленных друг от друга точках они статистически независимы.

Задание

1. На основе табл. 13 построить изолинии концентраций трех ЗВ – CO, NO, NO₂ методом кригинга, используя теоретическую вариограмму, найденную в предыдущей работе (см. Приложение 5).
2. В текстовом отчете Grid Report посмотреть ошибку интерполяции каждого ЗВ.
3. Проанализировать полученные результаты.

Практическая работа № 2.3. Анализ пространственного распределения загрязняющих веществ на территории Санкт-Петербурга

Цель работы

Исследовать пространственное распределение загрязняющих веществ в Санкт-Петербурге.

Основные сведения

Влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе оказывают:

Природно-климатические условия

Комплекс метеорологических факторов (температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление, интенсивность солнечной радиации) может оказывать влияние на процессы рассеивания выбросов промышленных предприятий и выхлопных газов в атмосферном воздухе, эффективность многих естественных биологических методов очистки сточных вод и обезвреживания хозяйственно-бытовых и промышленных отходов. Большое значение для крупных городов имеет роза ветров – преимущественное их направление в течение года.

Рельеф местности

Рельеф играет большую роль в формировании микроклимата городской территории, изменяя температурный, влажностный, радиационный и ветровой режимы. Рельеф местности значительно влияет и на условия рассеивания поступающих в атмосферный воздух вредных выбросов. При температурных инверсиях и маловетреной погоде в долинах и котловинах накапливаются атмосферные загрязнения вследствие ухудшения условий для проветривания территории. Особенно остро эта ситуация проявляется в безветренную погоду и на плотно застроенных улицах с интенсивным движением автотранспорта, в пониженных частях города, замкнутых дворах.

Микроклимат

Каменные и атмосферные покрытия летом нагреваются и излучают тепло, что приводит к повышению температуры и влажности. Многоэтажная застройка снижает скорость движения воздуха, в результате загрязнение атмосферного воздуха увеличивается. Восходящие потоки над городом вызывают в тихую погоду приток прохладного воздуха от периферии к центру.

Поверхностные водоемы

Поверхностные водоемы снижают температуру воздуха, повышают влажность.

Озеленение

Зеленые насаждения улучшают микроклимат, ослабляют ветры, являются резервуаром чистого воздуха, выделяют в воздух фитонциды, кислород, поглощают углекислый газ. Почва, покрытая растительностью, хорошо поглощает солнечные лучи и снижает температуру летом.

Состояние загрязнения воздушного бассейна города зависит не только от количества выбросов загрязняющих веществ и их химического состава, но и от климатических условий, определяющих перенос, рассеивание и превращение выбрасываемых веществ. В целом климатические условия Санкт-Петербурга, влияющие на уровень загрязнения воздуха, несколько более благоприятны, чем в среднем по городам России (морской климат и благоприятные условия для рассеивания выбросов от промышленных предприятий и автотранспорта). Согласно розе ветров за год для Санкт-Петербурга город чаще продувается ветрами юго-западных (21 %) и западных направлений

(23 %). Вследствие этого над западными и юго-западными районами города чаще, чем над северными и восточными, появляется более чистый воздух.

Задание

1. Подготовить таблицы исходных данных по 20 станциям наблюдения. В каждом столбце таблицы выделить цветом или шрифтом максимальные значения переменной. Готовые таблицы необходимо вставить в отчет.

Таблица 14

Пример таблицы исходных данных по 20-ти станциям наблюдения

№ станции	Концентрации загрязняющих веществ					Метеопараметры			
	CO	NO	NO ₂	...	...	RH	T	направление ветра	скорость ветра
1.									
...									
20.									

2. Построить изолинии концентраций трех ЗВ – CO, NO, NO₂ (см. Приложение 5).

3. Построить 3D-графики пространственного распределения концентраций ЗВ.

4. Проанализировать полученные результаты.

5. Сравнить с картой промышленных зон Санкт-Петербурга, представленной в Приложении 7.

Практическая работа № 2.4.

Исследование среднемесячного распределения загрязняющих веществ

Цель работы

Исследовать среднемесячное распределение загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-Петербурга по данным всех станций наблюдения за несколько лет.

Задание

1. Найти среднемесячные значения концентраций ЗВ для всех станций наблюдения с помощью функции Excel «Описательная статистика».

2. Заполнить таблицу исходных данных.

Таблица 15

Таблица исходных данных
среднемесячных значений концентраций загрязняющих веществ

№ станции	Среднемесячные значения концентраций загрязняющих веществ		
	СО (мг/м ³)	NO (мкг/м ³)	NO ₂ (мкг/м ³)
1.			
...			
20.			

3. Перевести все значения концентраций в единицы ПДК_{сс}, для чего разделить значения концентраций на соответствующее значение ПДК_{сс}.

4. Построить изолинии концентраций в долях ПДК_{сс}.

5. Найти повторяемости различных направлений ветров по 8 румбам в секторах по 45° за аналогичный период, построить розу ветров (см. Приложение 6). Сравнить форму изолиний концентраций ЗВ с розой ветров.

6. Сравнить изолинии концентраций ЗВ с картой промышленных зон Санкт-Петербурга, представленной в Приложении 7.

7. Проанализировать полученные данные.

Приложения

Приложение 1. Титульный лист

Российский Государственный Гидрометеорологический Университет
Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №__
по дисциплине “Контроль загрязнения природной среды”
«Название работы»
Вариант__

Выполнил:
Проверил:

Санкт-Петербург
20__г.

Приложение 2. Определение температурной инверсии

Для определения причин загрязнения атмосферы воздуха в городе необходимо проанализировать распределение температуры с высотой. Это можно сделать с помощью архивных данных по зондированию атмосферы, находящихся по адресу: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

В окне «Region» выбрать «Europe», в окне «Year» выбрать год наблюдений, в окне «Month» выбрать месяц наблюдений и в следующем окне выбрать нужную дату наблюдений. На карте (рис. 1) выбрать станцию с названием «ULLI» (подчеркнуто линией), нажав на ее левой кнопкой мыши. Станция Воейково (ULLI) находится в Ленинградской области и может служить в качестве фоновой. В новом окне откроется архивный файл с данными за выбранную дату.

Зондирование атмосферы проводится два раза в день в 00 ч. и в 12 ч. по Гринвичу. Чтобы перевести время с Гринвича на московское, надо прибавить к данному времени 4 ч. В представленных ниже фрагментах табл. 1 и 2 – данные зондирования за 04 ч. и за 16 ч. московского времени 15 января 2010 г.

На рис. 2 представлен пример графика зависимости температуры от высоты по данным табл. 1.

Из графика (рис. 2) видно, что слой температурной инверсии наблюдается на высоте 748–1021 м. Из табл. 1 видно, что нижняя граница инверсии находится на высоте 748 м, мощность инверсии – 273 м, интенсивность инверсии – 1,8 °С. Из данных табл. 2 видно

Таблица 1

26063 ULLI St.Petersburg(Voejkovo) Observations at 00Z 15 Jan 2010

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1016.0	78	-5.7	-6.8	92	2.27	260	2	266.2	272.5	266.6
1000.0	201	-6.7	-7.7	93	2.15	275	8	266.4	272.4	266.8
984.0	326	-7.3	-8.1	94	2.12	280	12	267.1	273.0	267.5
944.0	649	-8.7	-9.2	96	2.03	293	13	268.8	274.5	269.2
932.0	748	-8.7	-9.1	97	2.07	298	13	269.8	275.6	270.2
925.0	807	-7.7	-8.1	97	2.25	300	14	271.4	277.8	271.8
919.0	858	-6.9	-7.2	98	2.43	304	13	272.8	279.6	273.2
900.0	1021	-6.9	-7.1	98	2.50	315	12	274.4	281.5	274.8
889.0	1117	-7.3	-7.3	100	2.50	314	12	274.9	282.0	275.4
876.0	1232	-7.7	-7.8	99	2.44	313	13	275.7	282.6	276.1
852.0	1448	-8.2	-9.6	90	2.17	310	14	277.3	283.6	277.7
850.0	1466	-8.3	-9.8	89	2.15	310	16	277.4	283.6	277.8
833.0	1623	-9.1	-11.9	80	1.85	315	17	278.2	283.6	278.5
817.0	1772	-11.1	-18.1	56	1.13	319	18	277.6	281.0	277.8

Таблица 2

26063 ULLI St.Petersburg(Voejkovo) Observations at 12Z 15 Jan 2010

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1023.0	78	-7.9	-9.0	92	1.90	0	0	263.5	268.7	263.8
1000.0	257	-7.5	-7.8	98	2.13	55	12	265.6	271.5	266.0
997.0	280	-7.5	-7.8	98	2.14	65	14	265.8	271.7	266.2
959.0	582	-8.1	-8.3	98	2.14	145	12	268.2	274.2	268.6
925.0	860	-10.7	-10.8	99	1.82	120	8	268.4	273.5	268.7
917.0	927	-11.1	-11.2	99	1.78	115	10	268.6	273.6	268.9
900.0	1072	-9.2	-9.4	99	2.09	105	14	272.0	277.9	272.3
886.0	1194	-7.7	-7.9	98	2.39	110	15	274.8	281.6	275.2
874.0	1300	-8.3	-8.5	98	2.31	115	16	275.2	281.8	275.6
850.0	1516	-9.7	-12.1	83	1.79	110	16	276.0	281.2	276.3
829.0	1708	-10.7	-13.1	82	1.69	98	15	276.9	281.8	277.2
822.0	1772	-10.1	-12.5	83	1.79	94	15	278.2	283.4	278.5
810.0	1885	-10.1	-14.4	71	1.56	87	15	279.4	284.0	279.6
807.0	1914	-10.1	-19.1	48	1.05	85	15	279.7	282.9	279.9

Click on the image to request a sounding at that location or enter the station number above.

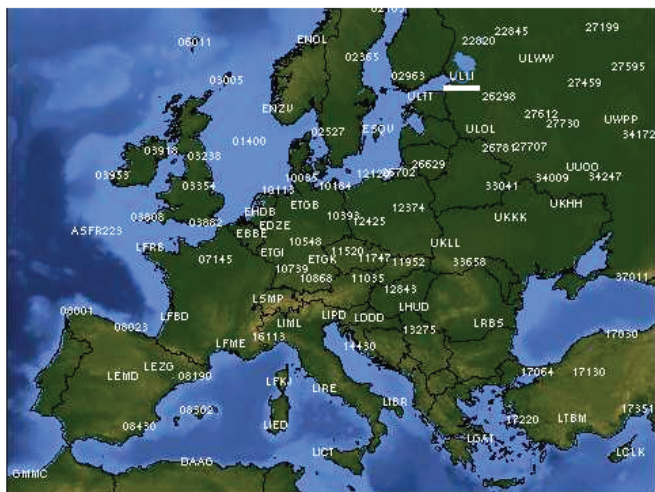


График зависимости температуры воздуха от высоты в атмосфере. По вертикальной оси отложена высота в метрах (0 до 1600), по горизонтальной — температура в градусах Цельсия (-9 до -5). Кривая показывает, что с высотой температура сначала понижается, достигая минимума около 800 м, а затем повышается до 1500 м.

37

также, что температура (3-й столбец) с высотой (2-й столбец) увеличивается в слое 927–1194 м.

При исследовании причин загрязнения атмосферы в городе следует проверить наличие температурной инверсии за исследуемый период времени.

В отчет необходимо вставить фрагмент таблицы данных зондирования с рассчитанными значениями мощности (ΔH) и интенсивности (ΔT) инверсии.

Приложение 3.

Работа с «Пакетом анализа» в «Excel»

Для проведения статистической обработки информации «Excel» включает в себя программную надстройку *«Пакет анализа»* и библиотеку из 78 статистических функций. Для вычисления коэффициентов корреляции в «Excel 97-2003» в меню «Сервис» выбрать «Анализ данных» и далее «Корреляция». В «Excel 2007»: выбрать вкладку «Данные», далее «Анализ данных»—«Корреляция». В качестве «входного интервала» выбрать весь интервал исследуемых значений концентраций ЗВ и метеопараметров.

Для активации «Пакета анализа» в «Excel 97-2003» нужно выполнить следующее:

- Запустить «Excel». Появится окно активного листа новой или существующей книги «Excel»;
- В меню «Сервис» выбрать пункт «Надстройки». Раскроется окно со списком доступных надстроек.

В этом списке найти «Пакет анализа». Поставить рядом с ним «галку». Если она уже стоит, ничего делать не надо. Нажать «ОК».

Посмотреть, в меню «Сервис» появится команда *«Анализ данных»*.

Для активации «Пакета анализа» в «Excel 2007» нужно выполнить следующее:

- Нажать кнопку в левом верхнем углу окна «Excel»;
- Выбрать «Параметры Excel», далее вкладку «Надстройки»;
- В раскрывшемся списке доступных надстроек выбрать «Пакет анализа», нажать кнопку «Перейти».
- После установки данной надстройки во вкладке «Данные» появится кнопка «Анализ данных».

Если в процессе указанной процедуры возникли дополнительные запросы со стороны системы (компьютера), значит для установки «Пакета анализа» потребуется дистрибутив «Microsoft Office».

Приложение 4. Примеры графиков для практических работ

4.1. Примеры графиков для работы № 1.1 представлены на рис. 3–4

01.01.10

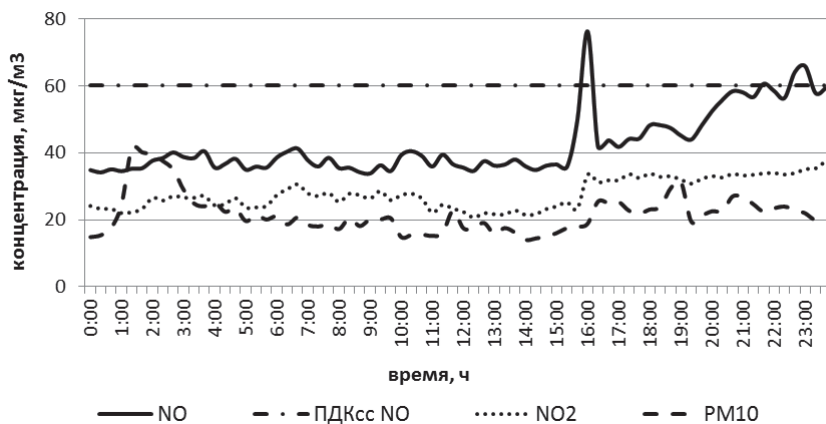


Рис. 3. График суточного распределения концентраций NO, NO₂, PM₁₀ 1 января 2010 г.

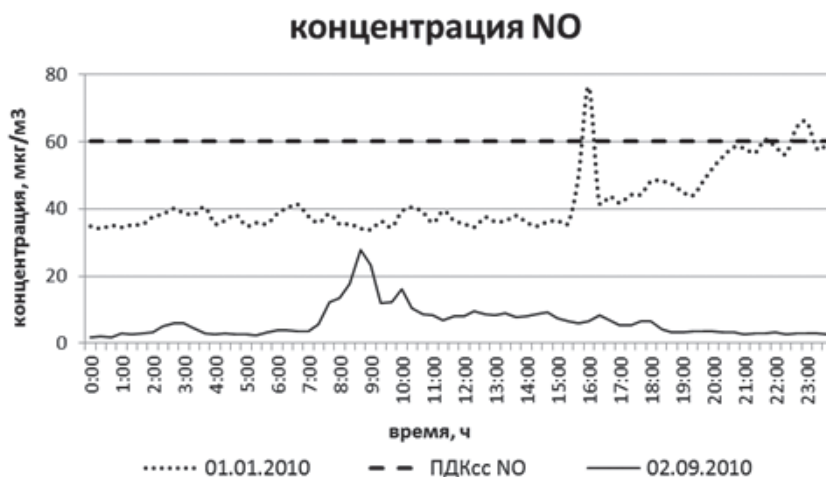


Рис. 4. График суточного распределения NO в разные месяцы года

4.2. Пример графика для работы № 1.2 представлен на рис. 5

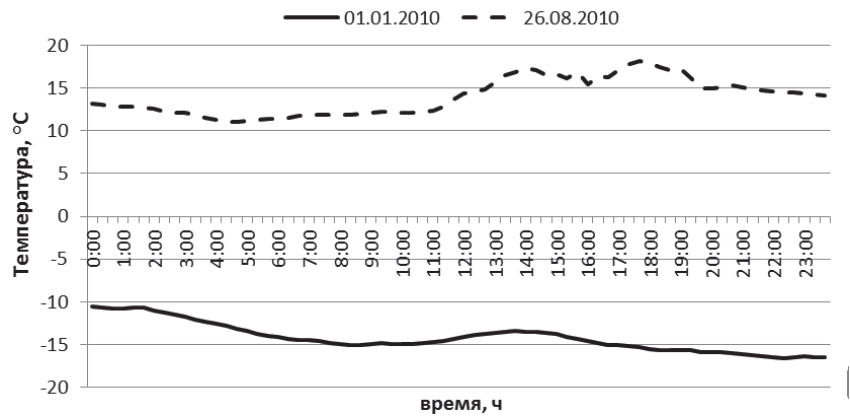


Рис. 5. График суточного изменения температуры в разные месяцы года

4.3. Примеры графиков для работы № 1.4
представлены на рис. 6–8

	CO	NO	NO2	NH3	PM10	влажность	температура	Направление ветра	Скорость ветра
CO									
NO			1						
NO2									
NH3									
PM10									
влажность									
температура			2				3		
Направление ветра									
Скорость ветра									

Рис. 6. Корреляционная матрица без коэффициентов корреляции с полями для анализа: 1 – поле коэффициентов корреляции между загрязняющими веществами; 2 – поле коэффициентов корреляции между загрязняющими веществами и метеопараметрами; 3 – поле коэффициентов корреляции между метеопараметрами

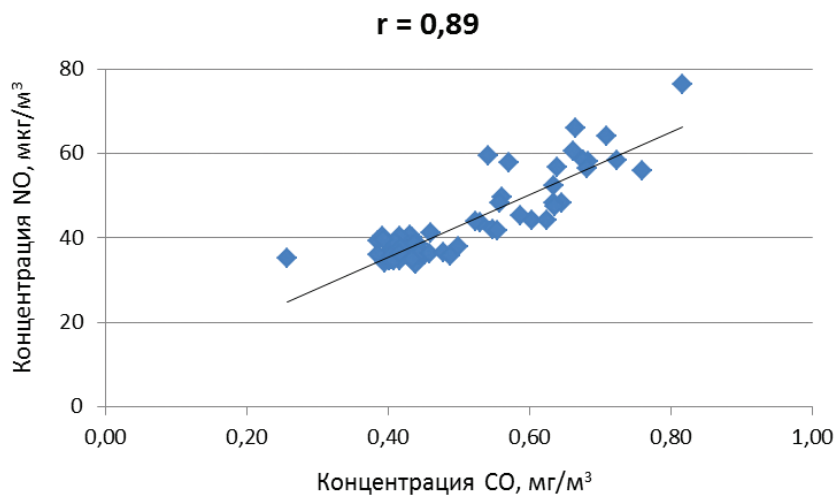


Рис. 7. Диаграмма рассеивания для элементов с наибольшим положительным значимым коэффициентом корреляции

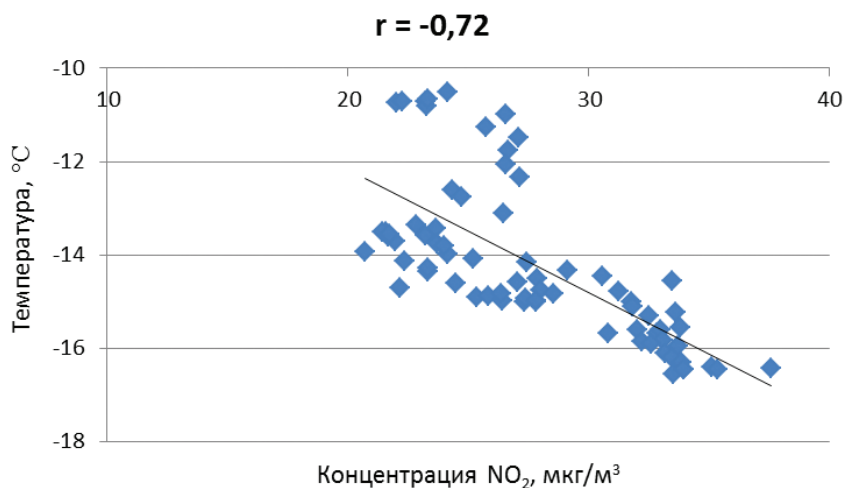


Рис. 8. Диаграмма рассеивания для элементов с наибольшим отрицательным значимым коэффициентом корреляции

4.4. Примеры графиков (рис. 9–11) и таблиц (табл. 3) для работы № 1.5

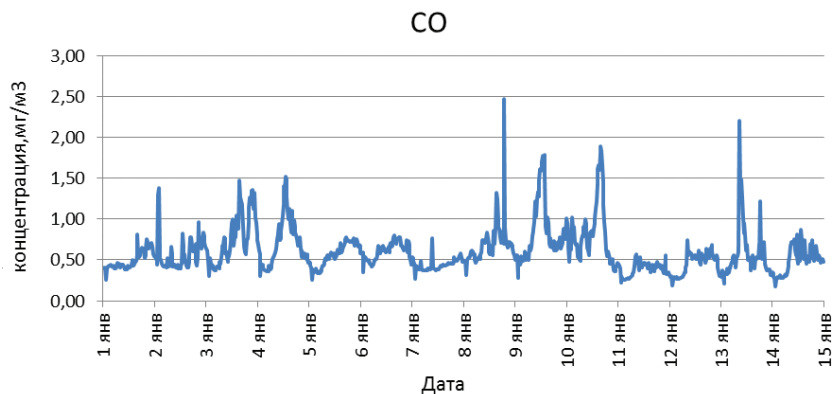


Рис. 9. График распределения СО за две недели с 01.01.10 по 14.01.10

Таблица 3

Максимальные, минимальные и средние значения концентраций ЗВ за 2 недели

СО				NO			NO ₂		
Дата	max	min	сред	max	min	сред	max	min	сред
13 сентября	1,50	0,12	0,58	159,93	10,56	57,71	55,93	23,77	37,01
14 сентября	1,58	0,23	0,66	95,47	3,34	36,06	54,11	27,59	38,44
15 сентября	0,67	0,25	0,37	50,82	1,81	15,22	53,27	26,72	38,51
16 сентября	2,95	0,15	0,64	218,89	0,79	34,75	59,15	9,99	36,76
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25 сентября	1,89	0,35	0,68	143,73	6,54	51,29	64,22	35,70	48,00
26 сентября	1,71	0,17	0,45	135,68	2,64	25,08	52,65	15,96	29,23

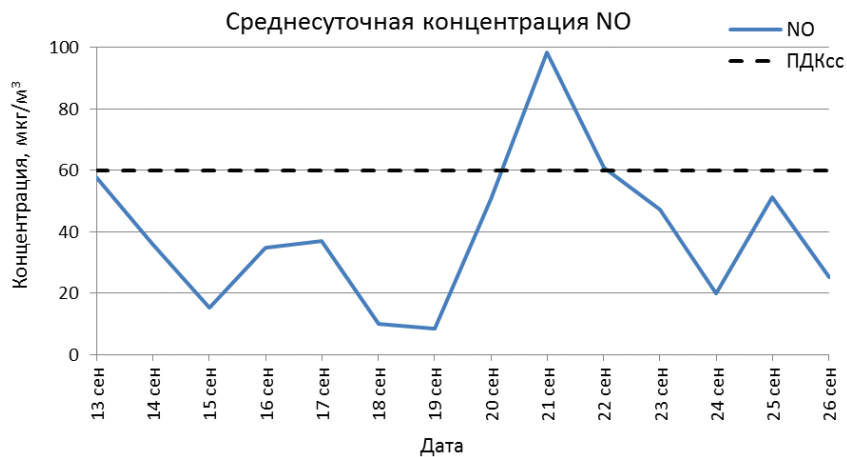


Рис. 10. График среднесуточной концентрации NO за две недели и среднесуточная ПДК_{сс} NO

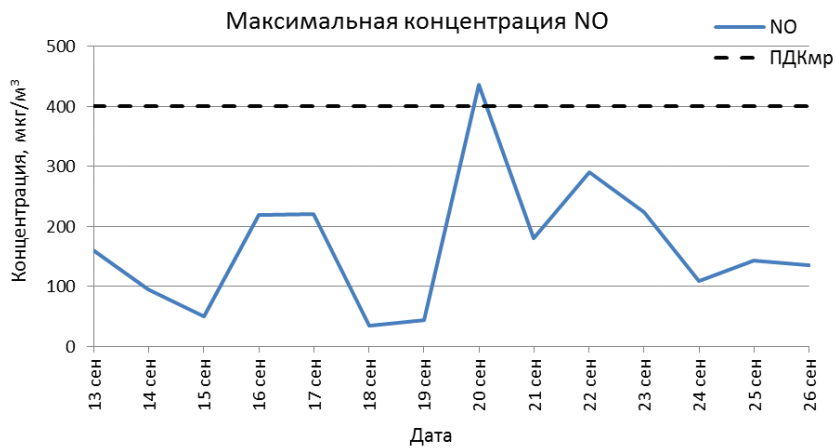


Рис. 11. График максимальной концентрации NO за две недели и максимально-разовая ПДК_{мр} NO

4.5. Примеры графиков (рис. 12–14) и таблиц (табл. 4) для работы № 1.6

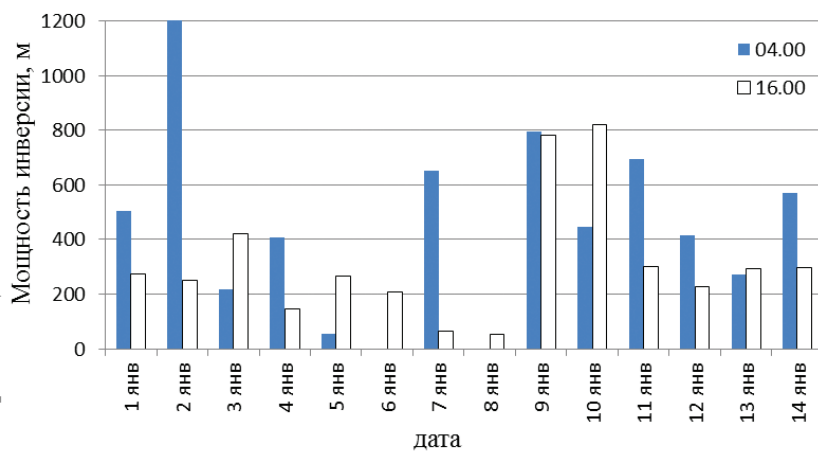


Рис. 12. График Мощности инверсии за сроки наблюдения 04:00 и 16:00 в интервале 01–14 января 2010 г.

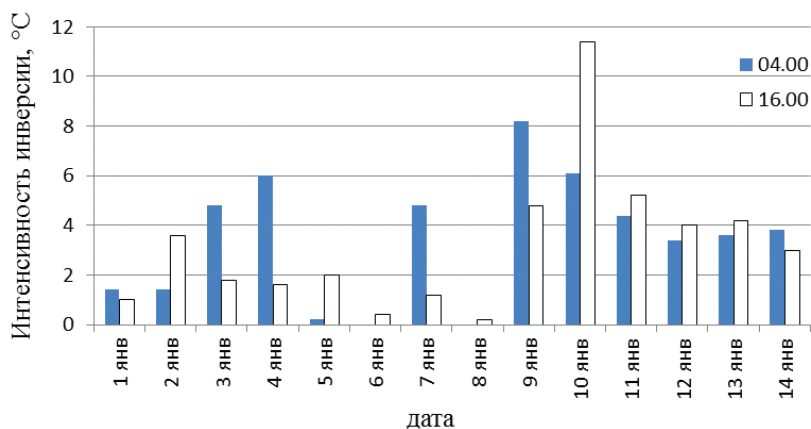


Рис. 13. График интенсивности инверсии по модулю за сроки наблюдения 04:00 и 16:00 в интервале 01–14 января 2010 г.

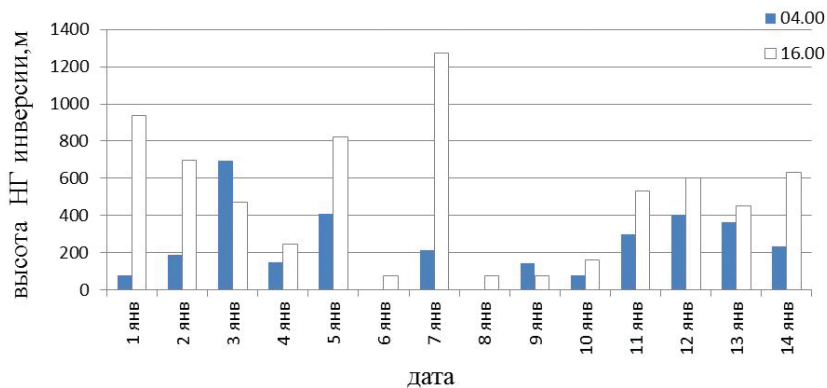


Рис. 14. График высоты нижней границы инверсии за сроки наблюдения 04:00 и 16:00 в интервале 01–14 января 2010 г.

Таблица 4

Пример корреляционной матрицы, в которой выделено поле коэффициентов корреляции между концентрациями ЗВ и характеристиками инверсии

	CO	NO	NO ₂	Высота НГ	Мощность инверсии	Температура НГ	Интенсивность инверсии	Температурный градиент
CO	1							
NO	0,99	1,00						
NO ₂	0,70	0,74	1,00					
Высота НГ	-0,44	-0,39	0,17	1,00				
Мощность инверсии	0,06	0,04	-0,16	-0,53	1,00			
Температура НГ	-0,56	-0,52	-0,25	0,51	-0,55	1,00		
Интенсивность инверсии	0,94	0,92	0,70	-0,43	0,19	-0,71	1,00	
Температурный градиент	0,67	0,66	0,76	-0,03	-0,26	-0,54	0,72	1

4.6. Примеры графиков для работы № 2.3 (рис. 15)

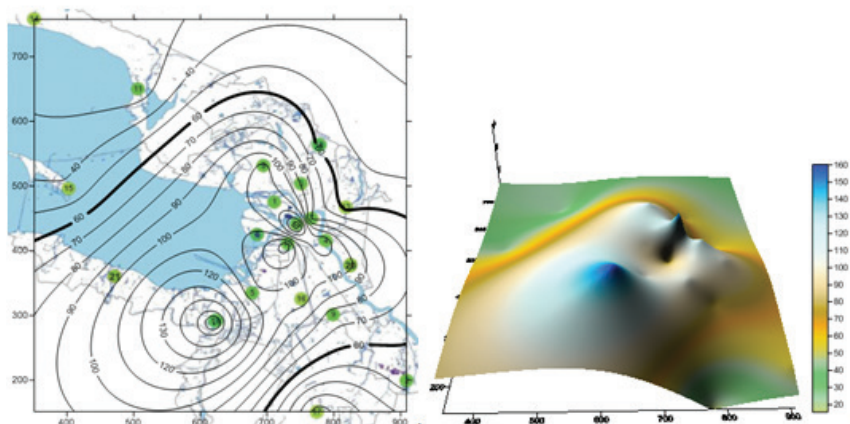


Рис. 15. Концентрация NO

Приложение 5.

Работа с программным пакетом «Surfer 9»

5.1. Загрузка схемы размещения станций (рис. 16)

Нажать на вкладку «Map», выбрать «new»—«base map», в открывшемся окне необходимо выбрать файл, содержащий схему размещения станций.

5.2. Оцифровка координат станций (рис. 17)

Нажать на вкладку «Map», выбрать «Digitize». Нажать на все станции по порядку и в открывшемся окне появятся координаты (x,y) всех станций. Сохранить полученный файл в папку с именем «имя файла.blb».

5.3. Добавление значений концентраций

Открыть файл, сохраненный в п. 5.2, с помощью Блокнота. Добавить 3-й столбец со значениями концентраций примеси по всем станциям наблюдения. При этом необходимо после последней координаты в каждой строке поставить запятую и пробел, десятичный знак отделяется точкой. Нажать на кнопку «Сохранить».

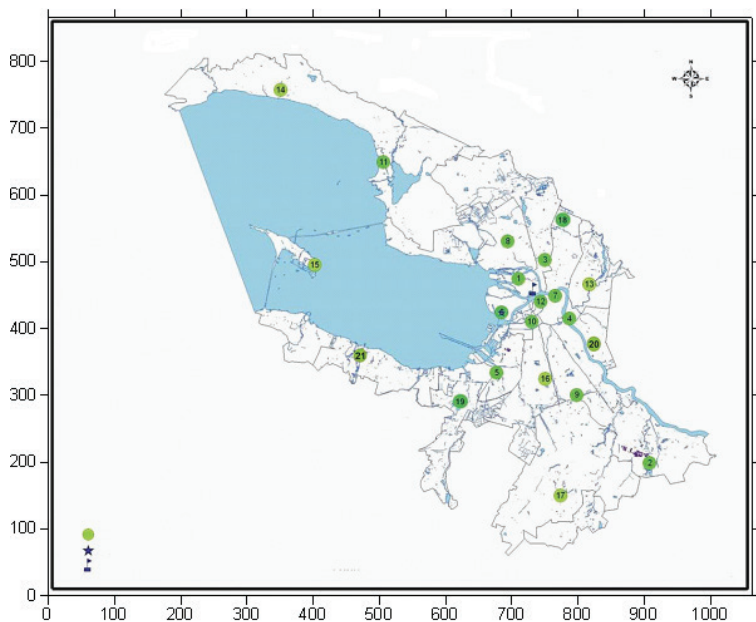


Рис. 16. Схема размещения станций

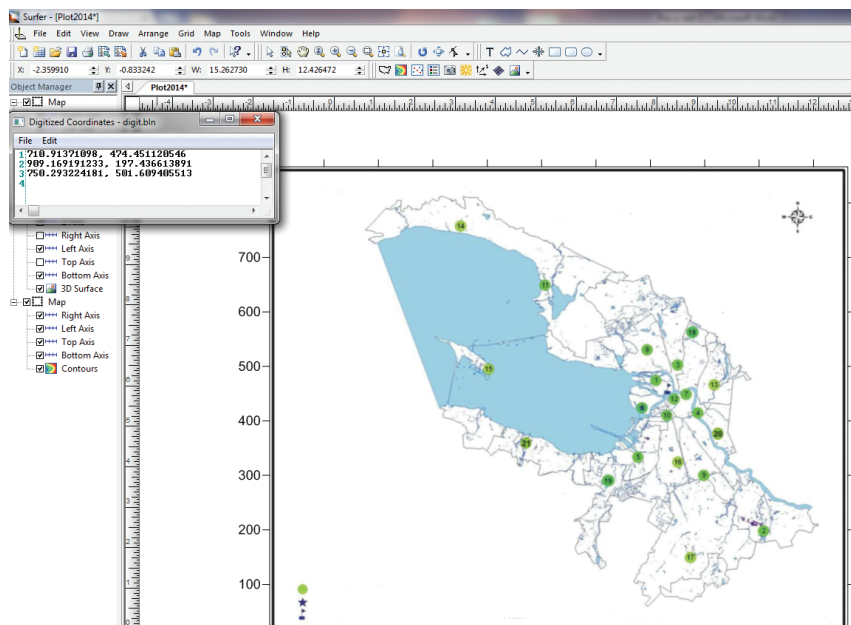


Рис. 17. Оцифровка координат станций

Фрагмент данных файла CO.blm

710.459648512, 475.595930588, 0.28
908.729864047, 197.847968834, 0.63
749.012190422, 503.651280261, 0.71
786.187855835, 415.276928793, 0.4
677.414612589, 335.319182228, 0.52
685.67587157, 425.096301179, 0.77
765.534708383, 448.9433484, 0.35

5.4. Построение вариограммы

Нажать на вкладку «Grid», выбрать «Variogram»–«New Variogram», в открывшемся окне выбрать файл «имя файла.blm», содержащий координаты станций и концентрации ЗВ – далее нажать ОК.

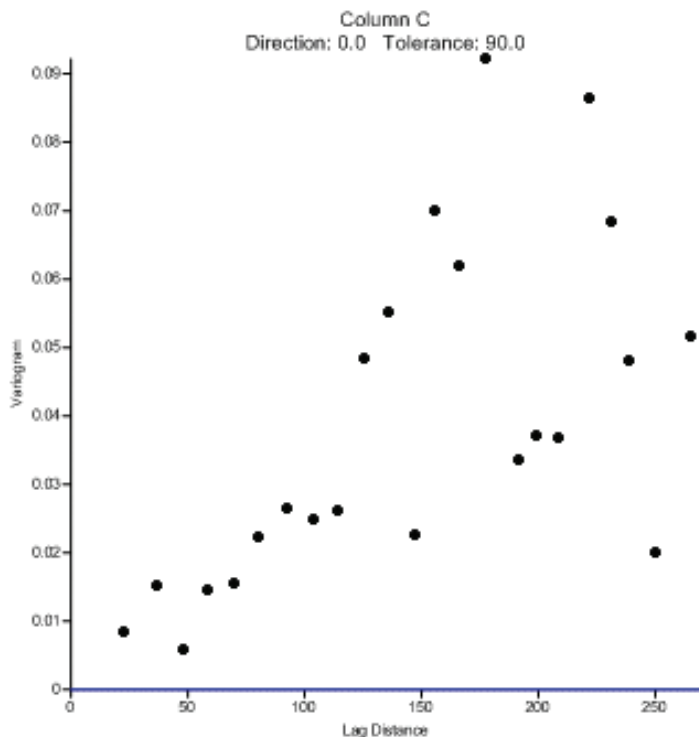
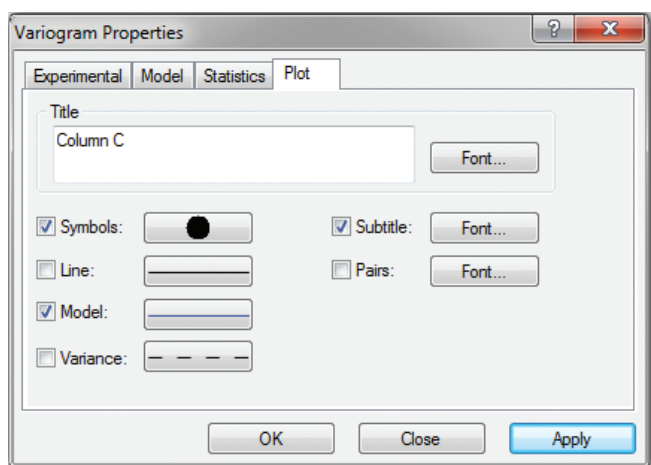
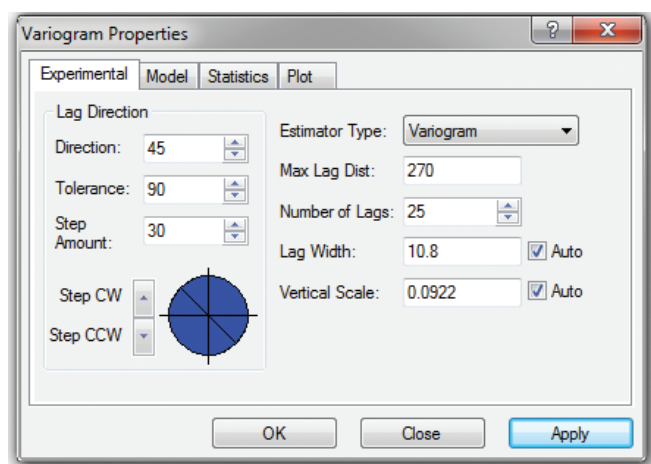


Рис. 18. Экспериментальная вариограмма

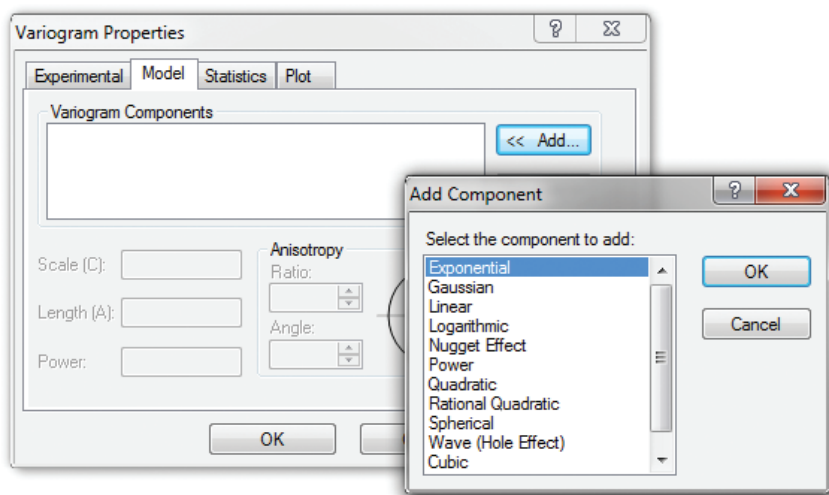
Нажать правой кнопкой мыши на рисунок и выбрать «Properties». Во вкладке «Plot» свойств вариограммы можно редактировать внешний вид маркеров и линий:



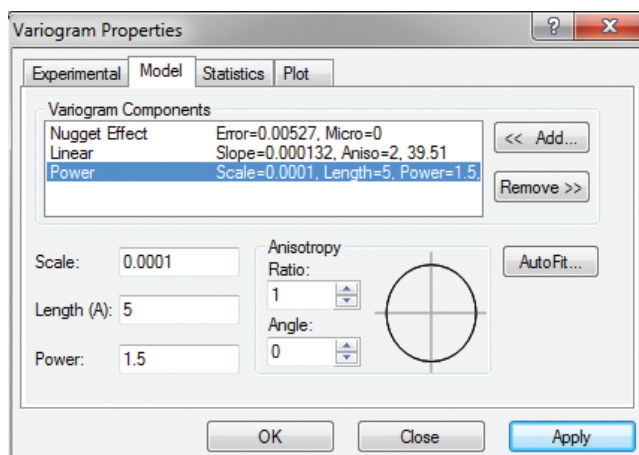
Во вкладке «Experimental» свойств вариограммы в окне «Direction» задать нужное направление (-45° , 90° , 0° , 45°), нажать кнопку «Apply»:



Во вкладке «Model» свойств вариограммы нажать кнопку «Add» и подобрать модель из списка, наилучшим образом описывающую экспериментальные данные:



Например, при выборе модели степенной функции, можно отредактировать ее параметры в окошках «Scale», «Length», «Power»:



В этом случае вариограмма выглядит следующим образом:

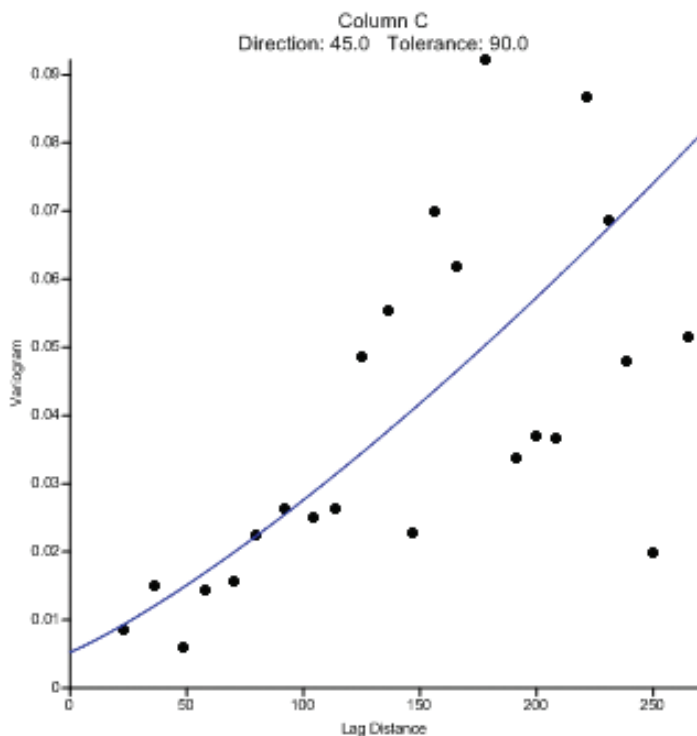
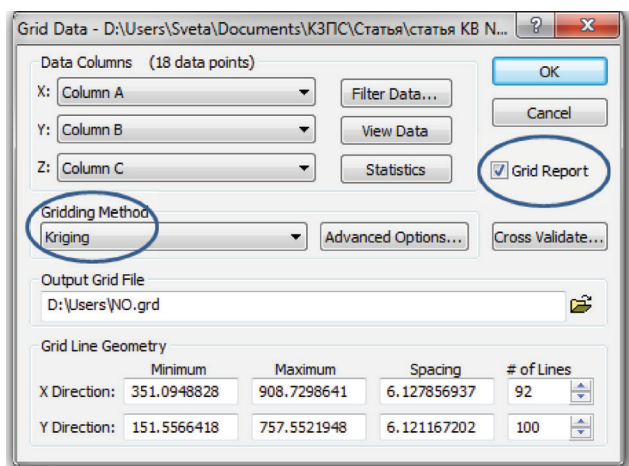


Рис. 19. Экспериментальная вариограмма
и ее степенная модель

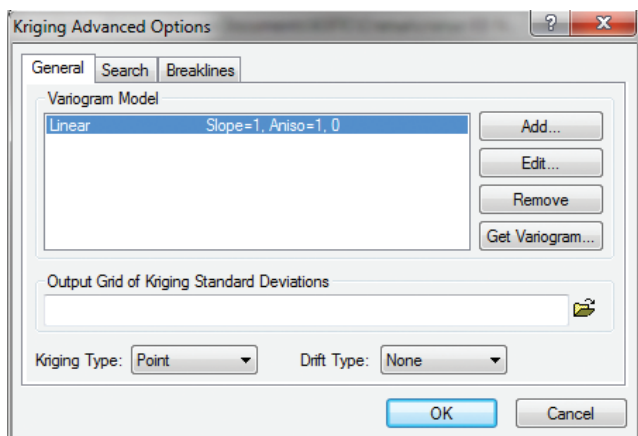
5.5. Построение изолиний (рис. 21)

Нажать на «Grid», выбрать «Data». В открывшемся окне выбрать файл, сохраненный в п. 5.3. В открывшемся окне проверить, чтобы в строке «Gridding Method» был выбран «Kriging». Нажать ОК. После этого в папке появится файл с тем же названием, что в п. 5.3, но с расширением «.grd».

В правой части основного диалогового окна «Grid Data» расположен переключатель «Grid Report», который дает возможность сформировать текстовый отчет о проделанной процедуре интерполяционного оценивания.



С помощью кнопки «Advanced Options» открыть окно «Kriging Advanced Options», куда ввести найденную в предыдущей работе модель вариограммы.



Нажать на вкладку «Map», выбрать «New»—«Contour map». В открывшемся окне выбрать файл «имя файла.grd» на рис. 20 показан пример изображения карты изолиний концентрации СО.

Наложить карту изолиний (рис. 20) на схему размещения станций (рис. 16) и совместить координаты карты изолиний с координатами карты расположения станций (рис. 21).

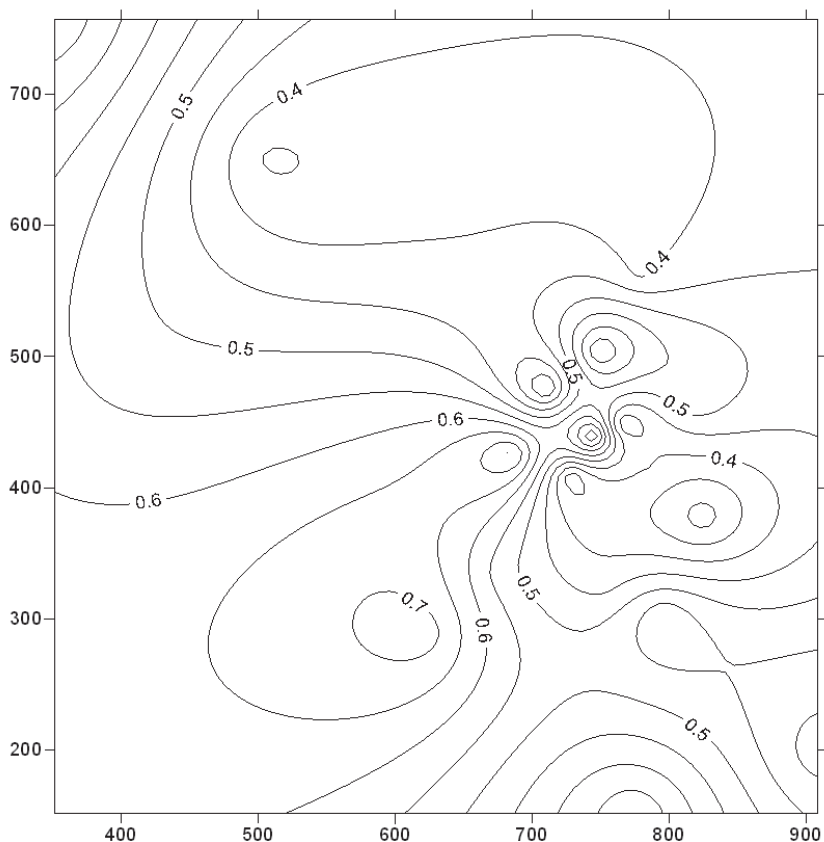


Рис. 20. Карта изолиний концентрации CO

Нажать «Ctrl»—«Print Screen», открыть графический редактор (например, «Paint»), вставить скопированное изображение, обрезать по контуру координат карты с изолиниями и вставить полученный график в презентацию.

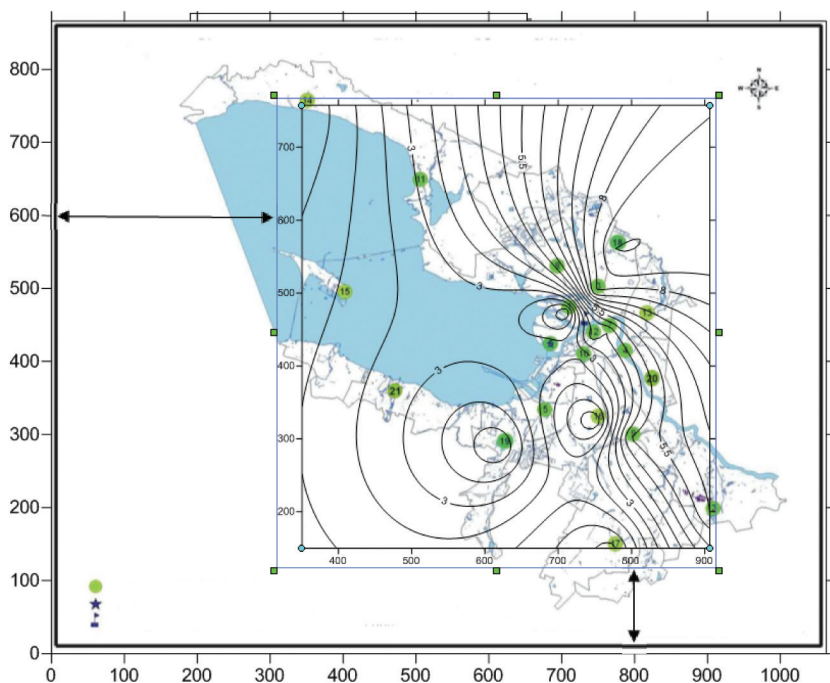
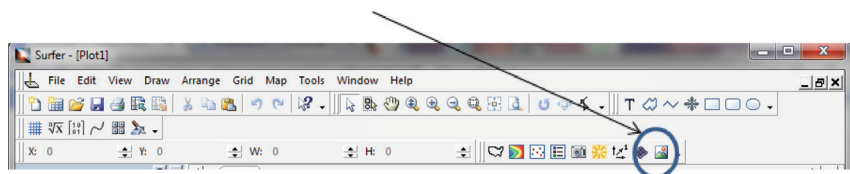


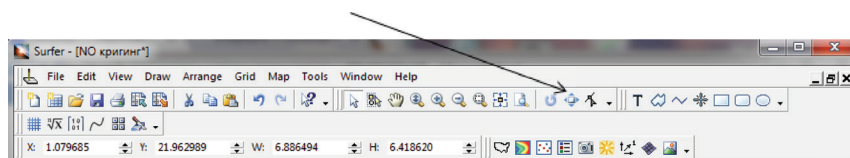
Рис. 21. Карта с изолиниями

5.6. Построение 3D-графика (рис. 22)

Нажать на кнопку «New 3D Surface»:



В открывшемся окне выбрать файл «имя файла.grd».
Нажать на кнопку «Trackball» и выровнять 3D-график.



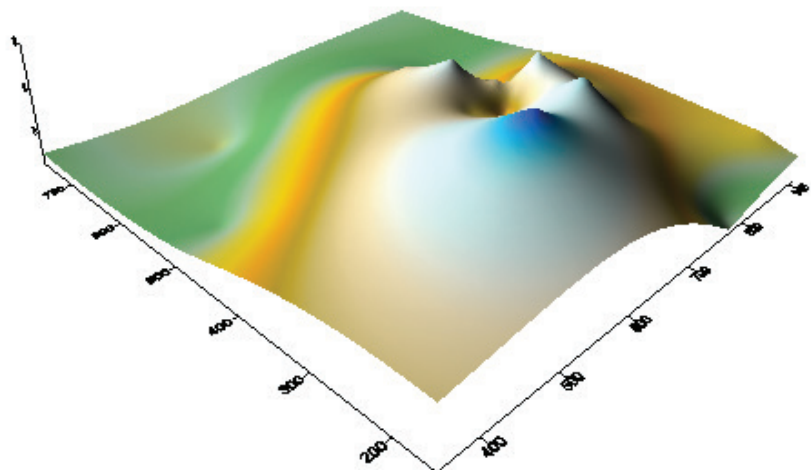


Рис. 22. 3D график концентрации NO

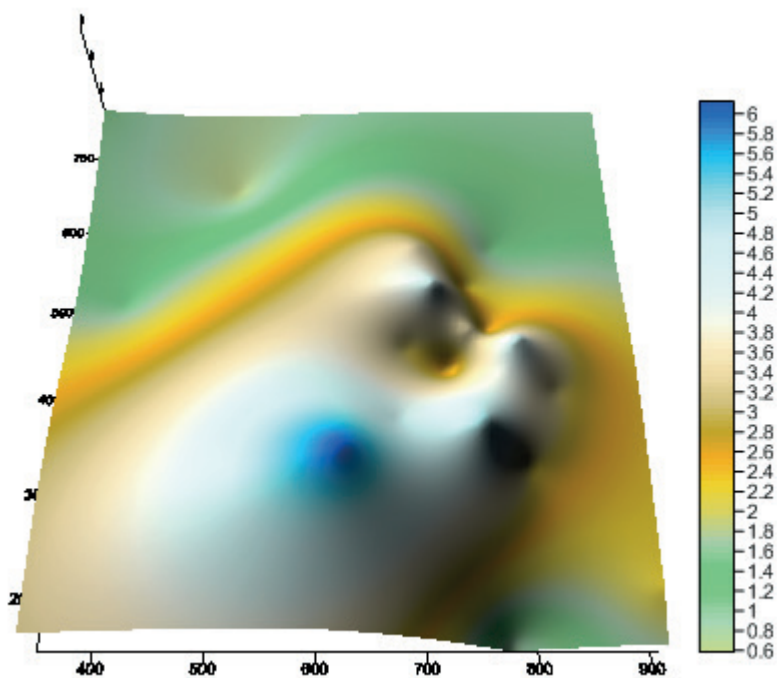
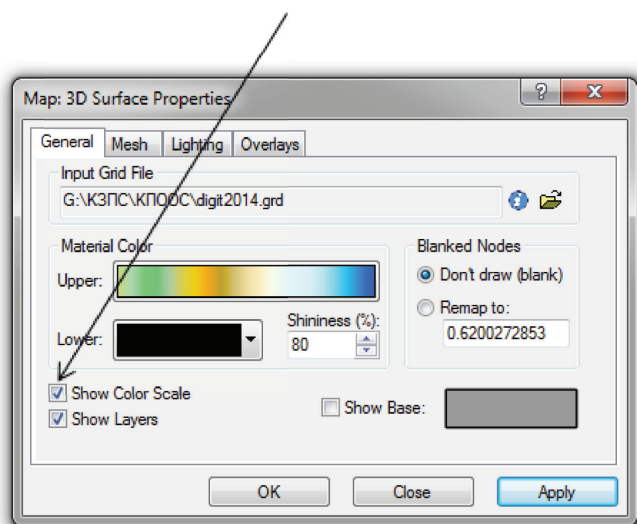


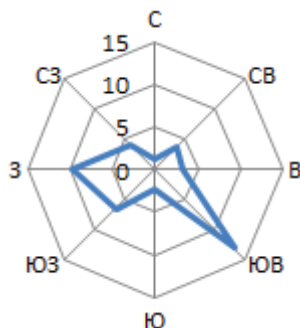
Рис. 23. 3D график концентрации NO с цветовой шкалой

Для отображения цветовой шкалы со значениями концентраций необходимо нажать правой кнопкой в левом нижнем углу графика, выбрать «Properties» и поставить галочку «Show Color Scale».



Приложение 6. Построение розы ветров

Направление ветра	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Повторяемость	1,2	3,7	3,3	13,1	2,4	6,5	9,8	4,1



Приложение 7

На рис. 24 представлена карта основных промышленных зон Санкт-Петербурга.



Рис. 24. Основные промышленные зоны Санкт-Петербурга

Список рекомендуемой литературы

1. Беккер А.А., Агаев Т.Б. Охрана и контроль загрязнения природной среды. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 67 с.
2. Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. Система прогноза и предотвращения высоких уровней загрязнения воздуха в городах. – СПб.: Гидрометеиздат, 2004. – С. 8–65.
3. ГН 2.1.6.1338-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.
4. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоestatистика: теория и практика / под ред. Р.В. Арутюняна; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
5. Еремкин А.И., Квашин И.М., Юнкеров Ю.И. Нормирование выбросов, загрязняющих веществ в атмосферу. – М.: Изд. Ассоциации строительных вузов, 2001. – С. 30–50.
6. Зарубин Г.П., Новиков Ю.В. Гигиена города. – М.: Медицина, 1986. – С. 104–109.
7. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния окружающей среды. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
8. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Доклады Академии наук. – 2002. – Т. 385, № 4. – С. 541–548.
9. Мальцев К.А., Мухарамова С.С. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): Учебное пособие. – Казань: Казанский университет, 2014. – 103 с.
10. Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Сб. докладов на международном симпозиуме в Ленинграде, июль 1968 г. / под ред. Берлянда М.Е. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 51 с.
11. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 359 с.
12. РД 52.04.306-92 Охрана природы. Атмосфера. М.: Росгидромет, 1993.
13. РД 52.04.667-2005 Состояние загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. М.: Росгидромет, 2005.
14. Савельев А.А., Мухарамова С.С., Пилюгин А.Г., Чижикова Н.А. Геоestatистический анализ данных в экологии и природопользовании (с применением пакета R). Учебное пособие. – Казань: Издательство Казанского университета, 2012. – 120 с.

Содержание

Введение	3
1. Анализ временных рядов концентрации загрязняющих веществ	6
Практическая работа №1.1. Исследование суточных рядов концентрации загрязняющих веществ	6
Практическая работа № 1.2. Исследование влияния метеорологических параметров на концентрацию загрязняющих веществ	10
Практическая работа № 1.3. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха	12
Практическая работа № 1.4. Корреляционный анализ концентраций загрязняющих веществ и метеопараметров	16
Практическая работа № 1.5. Анализ недельных временных рядов концентрации загрязняющих веществ	20
Практическая работа № 1.6. Исследование влияния температурных инверсий на загрязнение атмосферного воздуха	21
2. Анализ пространственного распределения концентрации загрязняющих веществ	25
Практическая работа № 2.1. Анализ пространственной корреляции	25
Практическая работа № 2.2. Интерполяция концентраций ЗВ на территорию Санкт-Петербурга методом кригинга	30
Практическая работа № 2.3. Анализ пространственного распределения загрязняющих веществ на территории Санкт-Петербурга	31
Практическая работа № 2.4. Исследование среднемесячного распределения загрязняющих веществ	33
Приложения	35
Приложение 1. Титульный лист	35
Приложение 2. Определение температурной инверсии	35
Приложение 3. Работа с «Пакетом анализа» в «Excel»	38
Приложение 4. Примеры графиков для практических работ	39
Приложение 5. Работа с программным пакетом «Surfer 9»	46
Приложение 6. Построение розы ветров	56
Приложение 7	57
Список рекомендуемой литературы	58

Лабораторный практикум

Крюкова С.В., Симакина Т.Е.

АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

Начальник РИО А.В. Ляхтейнен
Редактор Л.Ю. Кладова
Верстка М.В. Ивановой