

УДК 551.510

Комплексная оценка качества атмосферного воздуха в г. Геленджике

А.С. Сафатов¹, А.П. Агафонов¹, М.Ю. Аршинов², А.М. Бакланов³,
Б.Д. Белан², Г.А. Буряк¹, А.В. Фофонов², В.М. Генералов¹,
А.С. Козлов³, Н.А. Лаптева¹, С.Б. Малышкин³, Ю.В. Марченко¹,
С.Е. Олькин¹, И.К. Резникова¹, А.Н. Сергеев¹, Д.В. Симоненков²,
В.А. Терновой¹, Ю.В. Туманов¹, В.П. Шмаргунов^{2*}

¹ Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора
630559, Новосибирская обл., р.п. Кольцово

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³ Институт химической кинетики и горения СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

Поступила в редакцию 11.12.2017 г.

Качество атмосферного воздуха определяется концентрациями некоторых газовых загрязнителей и массовой концентрацией аэрозольных частиц в различных размерных фракциях. Широкий спектр загрязнителей атмосферы как в газовой, так и в аэрозольной фазах изучался в июле 2009 г. в районе г. Геленджика одновременно в нескольких наземных точках, в акватории бухты и на высотах до 2200 м. Таких комплексных экспериментов в изучаемом регионе ранее не проводилось. Для аэрозольных частиц определялись: распределение по размерам частиц от 3 нм до 32 мкм, элементный состав частиц (23 элемента), концентрации полиароматических углеводородов (14 соединений), ненасыщенных углеводородов, суммарного белка, некоторых биотоксинов и жизнеспособных микроорганизмов. Построены поля концентраций различных загрязнителей воздуха и интегрального индекса загрязнения атмосферы с использованием математической модели распространения примесей в приземном слое атмосферы и данных о реальных гидрометеорологических условиях в период проведения экспериментов. Полученные данные позволили оценить присутствие различных загрязнителей в атмосфере и рассчитать интегральный индекс загрязнения атмосферы в районе г. Геленджика. Среднесуточные значения измеренных концентраций загрязнителей сравнивались с соответствующими предельно-допустимыми концентрациями. Практически все они оказались меньше предельно-допустимых концентраций; интегральный индекс загрязнения атмосферы в районе г. Геленджика не превосходил единицы. Следовательно, атмосфера города в период проведения экспериментов не содержала загрязнителей в существенных количествах.

Ключевые слова: загрязнения воздуха, качество воздуха, химический состав аэрозоля, биологический состав аэрозоля, источники аэрозоля, PM_x ; air pollution, air quality, aerosol chemical composition, aerosol biological composition, aerosols sources, PM_x .

Введение

В настоящее время во всем мире осуществляют исследования присутствия и изменчивости в атмосфере газовых и аэрозольных загрязнителей [1–6], которые воздействуют на атмосферные процессы и климат [7–10] и могут оказывать негативное влия-

ние на экосистемы и здоровье населения [11–15]. Для улучшения среды обитания человека постоянно ужесточаются требования агентств по охране окружающей среды к качеству атмосферного воздуха [16–19]. Среди основных загрязнителей атмосферы, чаще всего контролируемых в различных странах, – газы CO , CO_2 , O_3 , NO_x и SO_2 и аэрозольные частицы

* Александр Сергеевич Сафатов (safatov@vector.nsc.ru); Александр Петрович Агафонов (agafonov@vector.nsc.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Анатолий Максимович Бакланов (anatoli@kinetics.nsc.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Галина Алексеевна Буряк (biryak@vector.nsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru); Владимир Михайлович Генералов (general@vector.nsc.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Наталья Александровна Лаптева (lapteva@

vector.nsc.ru); Сергей Борисович Малышкин (msb@ngs.ru); Юрий Васильевич Марченко (marchenko@vector.nsc.ru); Сергей Евгеньевич Олькин (olkin@vector.nsu.ru); Ирина Константиновна Резникова (reznikova@vector.nsc.ru); Александр Николаевич Сергеев (sergeeva_ma1961@mail.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Владимир Александрович Терновой (tern@vector.nsc.ru); Юрий Васильевич Туманов (tumanov@vector.nsc.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru).

размером не больше x (PM_x) [1, 2, 20–24]. Ранее гигиеническое нормирование (или оценка уровня массы этих частиц, при повышении которого возникает риск развития различных заболеваний) проводилось только для величины PM_{10} (см., например, [16]). В последние годы исследования показали, что наибольшее воздействие на здоровье оказывают мелкие частицы [11, 25], поэтому измеряются массы $PM_{2.5}$, PM_1 и даже фракций меньших размеров [23, 25–27] и вводятся гигиенические нормативы на эти величины [16, 21, 28, 29].

Очевидно, что вышеперечисленными загрязнителями не исчерпывается список веществ, которые способны негативно влиять на здоровье человека. Это влияние может быть оценено через риски возникновения различных заболеваний при высоких концентрациях загрязнителя в окружающей среде. В России эти оценки представляют собой предельно-допустимые концентрации (ПДК) вещества в воздухе, которые еще не вызывают у человека негативных реакций [29–32].

В настоящее время невозможно проведение измерений концентраций загрязнителей атмосферного воздуха для всего спектра соединений, находящихся как в газовом, так и в аэрозольном (или адсорбированном на поверхности аэрозольных частиц) состояниях [1, 33–36]. Такие измерения должны проводиться в реальном времени, поскольку изучаемая газо-аэрозольная система не является стационарной. Кроме того, в фиксированный объем входят/выходят потоки веществ, которые могут еще переходить из одной фазы в другую (испарение, конденсация, нуклеация) и участвовать в различных химических реакциях [34, 36, 37].

Так как в атмосферном воздухе одновременно присутствует множество различных загрязняющих веществ, встает вопрос об оценке их комплексного воздействия на человека. Такая задача в настоящее время не решена. В литературе практически отсутствуют данные о совместном действии даже пары загрязнителей [35, 38]. Для большего их числа таких данных нет вообще. Неясно существует ли синергизм или антагонизм действия загрязнителей, и если да, то насколько при этом их действие усиливается или уменьшается. Поэтому в нашей работе взаимное влияние загрязнителей учитывать не будет. Следуя [29], можно определить линейный комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) Y_n , который служит количественной мерой качества атмосферного воздуха. Его рассчитывают как сумму нормированных на среднесуточные ПДК (ПДК_{сс}) средних содержания n различных веществ:

$$Y_n = \sum_{i=1}^n Y_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_{ср\ i}}{ПДК_{сс\ i}} \right)^{c_i}, \quad (1)$$

где Y_i – единичный индекс загрязнения для i -го вещества; $q_{ср\ i}$ – средняя концентрация i -го вещества; ПДК_{сс\ i} – ПДК_{сс} для i -го вещества; c_i – безразмерная константа приведения степени вредности i -го вещества к вредности диоксида серы, зависящая от

того, к какому классу опасности принадлежит загрязняющее вещество [29].

Чем меньше Y_n , тем менее опасной была атмосфера за прошедшие сутки.

Очевидно, что ПДК_{сс} – не единственный нормирующий показатель. Величина Y_i может быть оценена как за более короткие, так и за более длинные промежутки времени. Но обычно нормативные документы в России [30, 31] оперируют именно со среднесуточным значением ПДК. Для других временных интервалов ПДК найдены лишь для некоторых веществ [30, 31].

Величина ПДК_{сс} может выступать «эталоном» для оценки благополучия воздушной среды, однако, как отмечено в [39], использование этого норматива в качестве единицы измерения сопряжено со значительными сложностями. Во-первых, для многих вредных веществ этот показатель не определен. Во-вторых, знание концентрации, например, тяжелого металла также оставляет неопределенность, поскольку неясно, в каком (каких) конкретно химическом соединении этот металл находился: для различных соединений металла ПДК_{сс} различны. И в-третьих, среднесуточные значения ПДК «пропускают» кратковременные выбросы высоких концентраций загрязнителя. Для сопоставления данных о загрязненности атмосферы несколькими веществами Y_n должны быть рассчитаны для одинакового числа (n) примесей. Если же n разные, то для расчета комплексного индекса Y_n используют значения индексов Y_i тех пяти веществ, у которых эти значения наибольшие [39].

В России, несмотря на актуальность подобных исследований, комплексная оценка ИЗА в регионе одновременно для газовых загрязнений и детально для загрязнений, находящихся в составе аэрозольных частиц, ранее не проводилась. Оценка индексов Y_n и Y_i в течение нескольких летних дней 2009 г. для г. Геленджика была целью настоящей работы.

Материалы и методы

Геленджик – курортный город на Черноморском побережье России с населением примерно 100 тыс. человек, в котором летом число отдыхающих достигает 2 млн. В городе нет промышленности, поэтому основными источниками загрязнений в нем должны быть дальний перенос газовых и аэрозольных загрязнений, а также локальные источники аэрозоля: автомобильный и морской транспорт, приготовление пищи, почва, дорожная пыль, растительность и морская вода.

Летом 2009 г. в районе г. Геленджика проведена оценка комплексного индекса загрязнения атмосферы с использованием трех наземных постов наблюдения (точки «Лаборатория» (Л), «Пирс» (П) и «Мыс» (М) на рис. 1), научно-исследовательского судна (С), находившегося в акватории Геленджикской бухты, а также самолета-лаборатории, пролетавшего над побережьем на высотах от 500 до 2200 м. Данные о гидрометеорологической обстановке во время проведения исследований фиксировались на двух метеостанциях (Л и станция Института океанологии (И))

с помощью метеоконкомплексов Vantage Pro2 Plus (Davis, Italy). Измеряемые значения атмосферного давления, температуры, относительной влажности, солнечной радиации, направления и скорости ветра усреднялись в течение 5 мин, кроме максимального значения скорости ветра, которое фиксировалось для каждого временного интервала. Важная информация о дальнем переносе аэрозоля получена из анализа обратных траекторий движения воздушных масс, приходящих в исследуемый регион во время наблюдений.

Концентрации аэрозольных частиц в диапазоне размеров 3 нм – 32 мкм (с использованием диффузионного спектрометра аэрозоля [40], фотоэлектрического счетчика аэрозоля Grimm 1.109 (Grimm Aerosol Technik GmbH, Germany) и 5-ступенчатого импактора андерсеновского типа БП-35/25-4 (НИИ БП, г. Москва, Россия)) и концентрации основных газовых загрязнителей фиксировались только в одной точке мониторинга – Л, а пробы атмосферного воздуха отбирались в четырех точках (рис. 1). Значения PM_{10} , $PM_{2,5}$ и PM_1 рассчитывались из счетных концентраций аэрозоля по размерам и средней плотности частиц, которая определялась из сравнения одновременно полученных данных счетчика аэрозоля Grimm 1.109 и импактора. Концентрации CO_2 измерялись с помощью прибора Li-6262 (LICOR Inc., USA), CO – Model 48C (Thermo Electron Corporation, USA), O_3 – Model 49C (Thermo Electron Corporation, USA), NO_x – хемилюминисцентного анализатора Model 200E (Teledyne Instruments, USA) и SO_2 – флуоресцентного анализатора Model 100E (Teledyne Instruments, USA).

Пробы атмосферного аэрозоля отбирались на волокнистые фильтры АФА-ХА-20 [41] и затем исследовались в лаборатории по методикам, рекомендуемым отечественными нормативными документами [22, 30].

Элементный состав проб определялся с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии по методике, описанной в [22], на спектрофотометрах С-115-М (Западприбор, Россия) и Perkin Elmer 3110 (Perkin Elmer, USA) с использованием российских государственных стандартных образцов. Диапазон напрямую измеряемых концентраций металлов (в скобках – точность их определения для доверительной вероятности $P = 0,95$) в пересчете на m^3 прокачанного воздуха, мкг: Cu – 0,01...200 (12); Zn – 0,01...100 (40); Fe – 0,20...400 (27); Mn – 0,02...400 (23); Al – 0,10...100 (25); Ba – 0,15...200 (31); Pb – 0,04...10 (15); Cd – 0,005...0,10 (10); As – 0,05...2 (25); Ca – 0,005...0,1 (22); Mg – 0,008...0,16 (25); Na – 0,01...4 (30); K – 0,02...6 (25); Co – 0,01...200 (20); Mo – 0,05...2 (36); Cr – 0,1...500 (31); Ni – 0,04...80 (23).

Концентрация иона SO_4^{2-} в растворимой фракции аэрозоля оценивалась с помощью ионной хроматографии [42] на приборе ИХ «Цвет-3006» (ОКБА НПО, г. Йошкар-Ола, Россия). Погрешность метода – 25%, порог определения при прокачке $1 m^3$ воздуха – 0,05 мкг.

Концентрация суммарного белка определялась флуоресцентным методом с применением красителя, описанного в [43]. Границы относительной погрешности (с доверительной вероятностью $P = 0,95$) определения суммарного белка на спектрофлуориметре Shimadzu RF-520 (Shimadzu, Japan) составляли $\pm 25\%$ во всем диапазоне измерений; диапазон измеряемых концентраций при прокачке $1 m^3$ воздуха – 0,003–50 мкг.

Концентрация полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) находилась методом высокоэффективной жидкостной хроматографии [44] на приборе Spectra-Physics SP8800 (Spectra Physics, USA). Диапазон измеряемых концентраций при прокачке



Рис. 1. Местоположение стационарных точек пробоотбора и метеостанций в районе г. Геленджика: Л, П, М – точки пробоотбора «Лаборатория», «Пирс» и «Мыс» соответственно; И – станция Института океанологии; С – научно-исследовательское судно

1 м³ воздуха, мкг: нафталин — 0,005...78,2; аценафтилен — 0,006...66,2; флуорен — 0,005...18,2; аценафтен — 0,007...74; фенантрен — 0,005...11,8; антрацен — 0,005...31,6; флуорантен — 0,005...36; пирен — 0,004...39,2; бенз(а)антрацен — 0,005...15,2; бенз(б)флуорантен — 0,005...22,8; перилен — 0,004...20; бенз(а)пирен — 0,001...27,4; 1,2,5,6-добензантрацен — 0,005...19,3; бенз(ghi)перилен — 0,003...16,6 при отборе 9 м³ пробы воздуха. Погрешность определения концентрации вышеперечисленных соединений не превышала 25%.

Концентрация суммарных нефтепродуктов (непредельных углеводородов) измерялась методом инфракрасной Фурье-спектроскопии [45] на приборе Varian FTS 1000 (Varian, USA); точность не превышала 20%; диапазон определяемых концентраций нефтепродуктов при прокачке 1 м³ воздуха — от 0,2 до 20 мг/м³.

Присутствие некоторых *биотоксинов* (например, токсина сине-зеленых водорослей, часто обнаруживаемого в прибрежных районах [46], холерного токсина и рицина) в пробах атмосферного аэрозоля определялось методом иммунохроматографии с помощью коммерческих наборов SMART™ Cholera O1 (New Horizons Diagnostics Corporation, USA), SMART™ II Ricin (New Horizons Diagnostics Inc., USA), BioDetect™ Test Strips (Alexeter Technologies, LLC, USA) или InstantChek Carbohydrate Identification Kit (EY Laboratories Inc., USA).

Концентрация жизнеспособных микроорганизмов определялась стандартным культуральным методом, описанным в [47]. Фильтры с пробами аэрозоля заливались питательной средой с содержанием NaCl 0,5 и 1,0%, инкубировались 6 ч при 37 °С и высевались при той же температуре на твердые питательные среды с содержанием NaCl 0,5 и 1,0% для получения и подсчета индивидуальных колоний (КОЕ).

Методом полимеразной цепной реакции с использованием специальных праймеров и дальнейшим секвенированием по методике, описанной в [47], выявлялись *наличие генетического материала микроорганизмов и их таксономическая принадлежность*.

Частицы, осевшие на различных ступенях импактора, исследовались на сканирующем электронном микроскопе LEO1430VP, снабженном энергетическим спектрометром OXFORD (Carl Zeiss, Germany), позволяющем проводить съемку в режиме обратно-рассеянных электронов для определения элементного состава индивидуальных частиц (размером до ~0,1 мкм) или даже их отдельных участков (для частиц больше 1 мкм).

Данные метеостанций использовались для восстановления 3-мерного поля скорости ветра в пространстве исследуемого региона по алгоритму, описанному в [48]. Исходя из определенных направления и скорости ветра, рассчитывался перенос аэрозоля от удаленного источника и строились поля концентраций контролируемых загрязнителей [49, 50]. Среднесуточные значения концентраций загрязнителей вычислялись как среднее за сутки из рассчитанных зна-

чений концентраций. После этого строились *поля концентраций загрязнителей и индекса ИЗА* в регионе.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены усредненные за 5 мин результаты измерений температуры, относительной влажности, направления и скорости ветра, атмосферного давления и интенсивности солнечной радиации за время проведения исследований. Приведенные данные показывают выраженные суточные циклы температуры, относительной влажности и солнечной радиации; смену дневных и ночных направлений ветра и плавное изменение атмосферного давления.

В этот период наблюдался суточный ход счетной концентрации аэрозольных частиц, более выраженный для частиц нанометровых размеров. Среднесуточные массовые концентрации аэрозоля во фракциях PM₁₀, PM_{2,5} и PM₁ (табл. 1) рассчитывались по данным счетчика аэрозольных частиц Grimm 1.109 со значением средней плотности частиц (2,05 ± 0,14) г/см³. Плотность частиц аэрозоля в районе исследований оценивалась из сравнения данных счетчика аэрозольных частиц и импактора по шести измерениям. Данные в табл. 1 показывают, что в период проведения исследований в г. Геленджике масса аэрозольных частиц в воздухе была невелика — существенно ниже установленных в России нормативов [32] и ниже, чем в городах на побережье Средиземного моря [3, 51–53].

Проведение во время исследований самолетного зондирования атмосферы позволило построить вертикальные профили некоторых метеорологических параметров и концентраций загрязнителей. Ярко выраженные слои повышенных концентраций CO, CO₂, O₃ и аэрозольных частиц размерами 0,3–25 мкм наблюдались на высотах до 500 и до 1000 м н. у. м. в направлении вдоль побережья. В направлении, перпендикулярном побережью, такие слои не наблюдались. Вероятно, они были обусловлены выбросами ближайшего промышленного центра и порта — г. Новороссийска — и соответствующим направлением ветра в период проведения самолетного зондирования атмосферы.

В соответствии с формулой (1) рассчитаны индексы ИЗА, относящиеся к газовым загрязнителям и массе аэрозольных частиц (табл. 2). Видно, что концентрации этих веществ в период наблюдения не приближались к их ПДК_{сс}, а величина ИЗА для суммы всех загрязнителей не превосходила 0,84.

Результаты химического, элементного и биологического анализов отобранных проб аэрозоля представлены в табл. 3–6. Поскольку очень низкие концентрации загрязнителей в атмосфере не дают практически никакого вклада в ИЗА, достаточно определения концентраций на уровнях, превышающих 1% от соответствующих ПДК. Поэтому в табл. 3–6 не приведены данные для тех проб, в которых концентрация определяемого вещества не превышает порог его обнаружения. В частности, ни в одной пробе аэрозоля не определены превосходящие порог

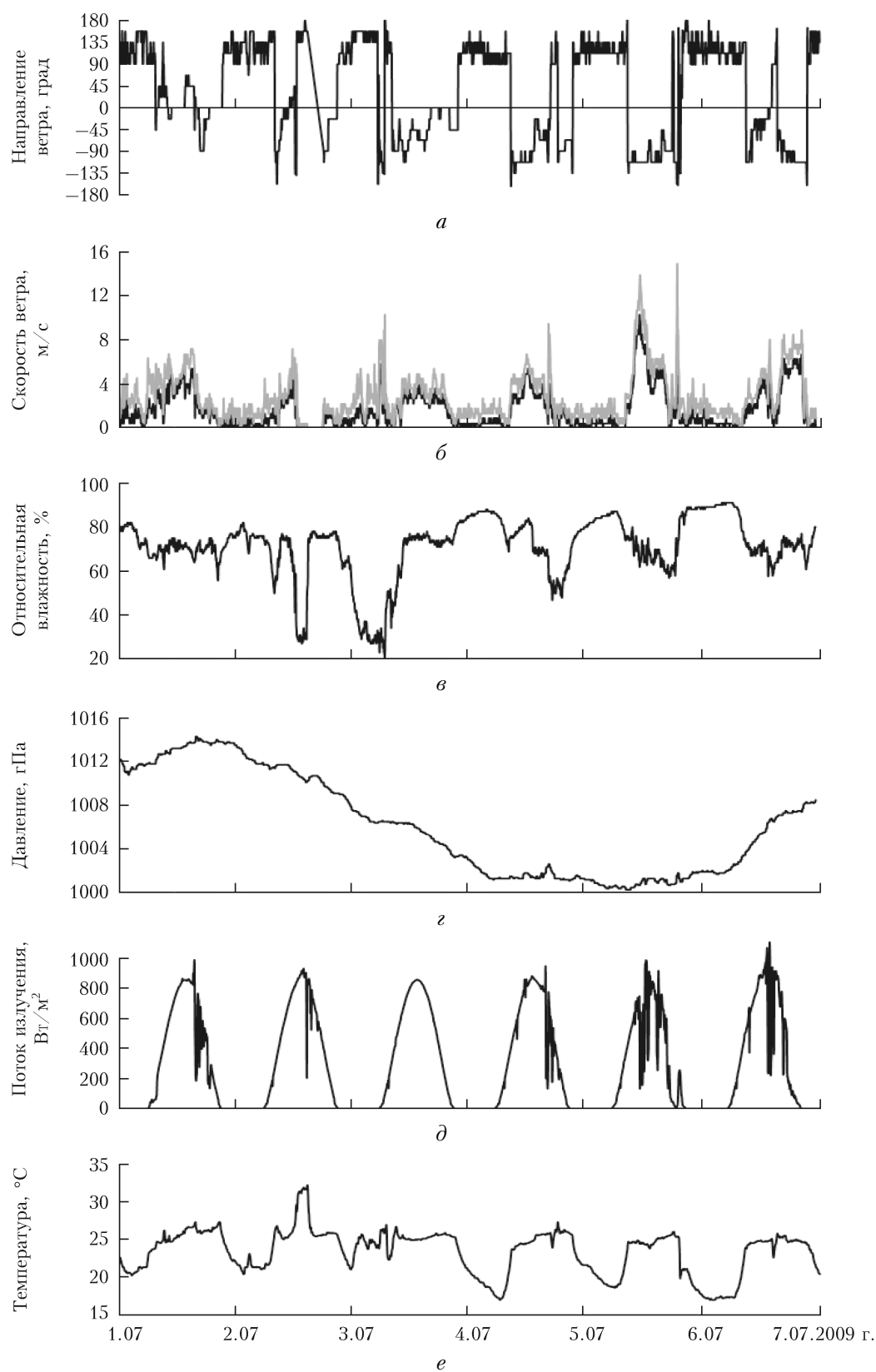


Рис. 2. Изменение метеопараметров за время проведения исследований в г. Геленджике: *a* – направления ветра (за 0 принято западное направление); *б* – средней скорости ветра за 5 мин (темная кривая) и максимального значения скорости ветра за этот период (светлая кривая); *в* – относительной влажности воздуха; *г* – давления; *д* – солнечной радиации; *е* – температуры

Таблица 1

Данные по массовой концентрации фракций аэрозоля и некоторым его компонентам в период наблюдения в 2009 г. в районе г. Геленджика

Дата измерения	PM ₁₀ , мкг/м ³	PM _{2,5} , мкг/м ³	PM ₁ , мкг/м ³	Морской аэрозоль, мкг/м ³	Суммарный белок, мкг/м ³
2.07	25,82 ± 4,38	14,15 ± 2,31	5,16 ± 0,78	1,11 ± 0,44	0,64 ± 0,35
3.07	17,57 ± 3,93	9,12 ± 2,48	4,38 ± 1,19	1,72 ± 0,96	0,95 ± 0,32
4.07	16,57 ± 3,68	9,88 ± 1,35	5,53 ± 0,66	0,89 ± 0,84	0,94 ± 0,08
5.07	14,87 ± 3,09	9,47 ± 1,96	5,09 ± 1,31	4,04 ± 1,60	1,52 ± 0,40
6.07	16,37 ± 4,76	9,73 ± 2,19	5,32 ± 1,31	1,29 ± 0,49	1,44 ± 0,53

обнаружения концентрации ПАУ и нефтепродуктов. В наземных пробах, приведенных в табл. 3, концентрации следующих химических элементов не выше порогов обнаружения: As, B, Cd, Cr, Ni, Ti; в высотных пробах (табл. 4) – As, B, Cd, Cr, Li и Mo. Для всех других веществ хотя бы в одной пробе порог обнаружения был превышен (см. табл. 3–6), но в целом их концентрации в аэрозоле оказались невелики. В высотных пробах, взятых с борта самолета при полете вдоль побережья на высотах 1000–2000 м в районе г. Геленджика, обнаружены повышенные концентрации Ca, Ni и в одной пробе Na (см. табл. 4). Вероятно, они обусловлены выбросами цементных заводов г. Новороссийска, которые, как следует из рассмотрения обратных траекторий движения воздушных масс, могли достигнуть исследуемого района в период проведения самолетного зондирования. Суммарная масса аэрозольных частиц, определенная как сумма масс контролируемых химических элементов и ионов, в этот момент в максимуме превышала 37 мкг/м³, тогда как в наземных пробах она всегда была меньше 15 мкг/м³. Этот факт подтверждает наше предположение о том, что, скорее всего, в контролируемый регион произошел занос загрязненных воздушных масс из соседнего региона.

Таблица 2

Результаты измерений $q_{ep}/ПДК_{сс}$ для газовых загрязнителей и PM₁₀ в 2009 г. в районе г. Геленджика

Загрязнитель	ПДК _{сс} , мг/м ³	Класс опасности c_i	Дата измерения		
			3.07	5.07	6.07
CO ₂	9000	4	0,085	0,0850	0,0840
O ₃	0,16	1	0,450	0,3601	0,3280
CO	20	4	0,010	0,0130	0,0080
SO ₂	10	4	–	0,0006	0,0013
NO _x	5	4	–	0,0015	0,0018
PM ₁₀	0,06	3	0,293	0,2500	0,2600
ИЗА			0,838	0,7111	0,6831

Располагая данными по химическому составу аэрозоля, можно получить информацию о его возможных источниках. Концентрация морского аэрозоля определяется по наличию в нем Na, поскольку, как показано в работе [54], за счет поверхностных реакций в атмосфере могут образовываться молекулы Cl₂, которые покидают частицы, нарушая баланс между концентрациями Na и Cl в солевом

аэрозоле. Концентрация аэрозоля из биогенных источников определяется по концентрации суммарного белка, выбросы автомобильного и морского транспорта – по концентрации ПАУ, нефтепродуктов и некоторых других веществ. Другие источники также могут давать вклад в наблюдаемую концентрацию аэрозоля.

Из анализа данных по химическому составу аэрозоля и его массе следует, что морской аэрозоль составлял в период проведения наблюдений от 4 до 25% от массы PM₁₀ (табл. 1). Микроскопический анализ химического состава частиц, осажденных на различных ступенях импактора, показал, что среди аэрозолей размером > 0,1 мкм доля морского аэрозоля составила 3–10%. Точность проведения такого анализа низка, так как получение информации о химическом составе большого количества индивидуальных частиц требует очень больших трудозатрат. Тяжело определить объем частиц сложной формы, многие частицы имеют неоднородный химический состав и т.д. По этим же причинам чрезвычайно сложно получить аналогичную информацию для различных размерных фракций частиц. Метод позволяет обнаруживать только относительно большие частицы, поэтому с его помощью нельзя изучать частицы диаметром менее ~0,1 мкм, адсорбционные слои органических и биоорганических соединений на поверхности более крупных частиц. Однако этот метод дает уникальную информацию об индивидуальных частицах в составе атмосферного аэрозоля.

Анализ частиц, обнаруженных на различных ступенях импактора, работавшего в условиях, когда преобладал ветер с суши, показал, что среди них мало частиц морского происхождения (в них в значительных количествах должны одновременно присутствовать Na, Cl, Mn, Mg, S и O). Доля морского аэрозоля в исследованных пробах, взятых при различных направлениях ветра, невелика (табл. 1), что хорошо согласуется с данными других авторов [51–54]. Об этом же косвенно свидетельствует работа [55], где отмечено незначительное падение концентрации аэрозоля при смене ветра с суши на ветер с моря. Для восточного Средиземноморья доля морского аэрозоля по оценке, основанной на данных [33], летом достигает 20%, что несколько превосходит микроскопически определенные значения, а для района Рима эта величина в октябре–июле в среднем составляла 3–7% [56]. Подчеркнем, что суммарные массы аэрозоля, обнаруженные в этих исследованиях, как правило, заметно выше.

Концентрации химических элементов и иона SO_4^{2-} ($мкг/м^3$) в наземных пробах атмосферного воздуха, взятых в различных точках г. Геленджика (серые ячейки – время пробоотбора в лаборатории (с 10:00 5.07 по 10:00 6.07))

Загрязнитель	Дата пробоотбора																												
	2.07						3.07						4.07						5.07										
	С	П	М	Л	Л	С	С	П	М	Л	Л	С	С	П	М	Л	Л	С	С	П	М	Л	Л	С	С	П	М	Л	Л
Al	0,073	0,081	0,111	0,215	0,143	0,080	0,016	0,051	0,047	0,038	0,039	0,099	0,073	0,074	0,095	0,068	0,066	0,046	—	0,074	0,065								
Ba	0,007	0,004	0,007	0,012	0,012	0,002	0,001	0,004	0,004	—	0,001	0,008	0,003	0,003	0,000	0,004	0,009	0,009	0,004	0,012	0,015								
Ca	2,403	4,344	8,960	6,060	5,305	1,705	1,855	5,072	2,833	1,428	2,055	5,960	1,628	3,400	3,044	2,772	3,022	4,622	1,055	4,166	4,944								
Co	—	—	—	—	—	—	—	—	0,012	0,011	0,014	0,011	0,009	0,012	0,012	0,013	0,011	0,012	0,013	0,014	0,011								
Cu	0,003	—	0,320	0,128	0,003	0,220	—	—	—	—	0,068	0,028	—	0,108	0,372	—	—	0,114	0,006	0,004	0,444								
Fe	—	0,044	0,100	0,344	—	—	—	—	—	0,078	0,044	0,144	—	0,111	—	—	—	—	—	—	—								
K	0,154	0,102	0,375	0,310	0,281	0,084	0,107	0,134	0,228	0,100	0,202	0,139	0,145	0,287	0,280	0,163	0,255	0,073	0,009	0,231	0,305								
Li	—	—	0,003	0,006	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,003								
Mg	0,370	0,490	0,460	0,524	0,620	0,177	0,152	0,172	0,273	0,174	0,153	0,173	0,341	0,276	0,285	0,103	0,012	—	—	—	0,100								
Mn	0,014	0,010	0,025	0,034	0,024	0,005	0,003	0,015	—	0,006	0,007	0,024	—	0,010	0,006	0,007	0,009	0,009	0,001	0,003	0,010								
Mo	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,024	0,031	—	0,042	—	—	0,034								
Na	0,508	0,636	0,234	0,360	1,202	0,524	0,323	0,658	0,824	0,347	0,147	0,092	2,446	1,558	1,758	1,480	0,691	0,227	0,636	0,536	0,624								
P	—	—	0,349	0,120	<0,04	—	—	—	—	0,049	0,097	0,118	—	0,105	0,075	—	—	—	—	—	0,079								
Pb	0,070	0,084	—	0,015	0,128	0,002	0,306	0,139	0,105	0,173	—	0,029	—	—	—	0,223	0,177	—	0,313	—	0,032								
SO_4^{2-}	2,879	3,444	3,777	4,999	5,799	3,733	3,233	3,233	2,066	3,999	2,444	3,999	3,888	4,999	3,999	5,333	3,000	2,666	2,333	2,333	3,666								
Si	0,125	0,092	0,136	0,409	0,235	—	—	—	0,042	—	—	0,035	0,170	—	—	—	—	—	—	—	0,036								
Sr	0,024	0,047	0,063	0,059	0,058	0,014	0,015	0,027	0,016	0,012	0,013	0,030	0,014	0,022	0,018	0,018	0,012	0,017	0,005	0,013	0,019								
Ti	<0,005	<0,005	0,006	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—								
Zn	0,046	0,036	0,090	0,100	0,083	0,051	0,013	0,025	0,300	—	—	0,006	0,063	0,012	—	0,008	—	0,061	—	0,007	0,038								
Σ	6,676	9,414	15,016	13,695	13,897	6,597	6,024	9,530	6,749	6,414	5,284	10,895	8,775	10,977	9,968	10,227	7,267	7,898	4,371	7,414	10,431								

Примечание: прочерк – концентрации ниже порога обнаружения; для Mo $0,01ПДК_{ср} = 5$ $мкг/м^3$ [31].

Таблица 4

Концентрации химических элементов и иона SO_4^{2-} ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в пробах атмосферного воздуха, взятых в ходе самолетного зондирования атмосферы в 2009 г. в районе г. Геленджика

Загрязнитель	Дата, время, высота пробоотбора, направление полета					ПДК [31]
	5.07, 15:23–15:55, 2100 м, вдоль берега в Анапу	06.07, 13:03–13:18, 2000 м, вдоль берега в Сочи	06.07, 13:52–14:05, 1500 м, вдоль берега в Анапу	06.07, 14:07–14:20, 1000 м, вдоль берега в Сочи	06.07, 14:44–15:12, 500 м, вдоль берега в Анапу	
Al	0,126	0,166	0,906	0,340	0,194	20
Ba	0,010	0,017	0,066	0,028	0,017	15
Ca	3,880	6,017	17,488	10,047	4,465	10
Co	–	0,012	0,014	0,011	0,007	0,1
Cu	0,013	0,008	0,041	0,028	0,012	10
Fe	0,254	0,473	3,115	0,719	0,341	100
K	0,097	0,104	0,483	0,272	0,321	10
Mg	0,650	1,077	1,790	2,488	0,692	100
Mn	0,011	0,012	0,059	0,034	0,021	10
Na	0,802	1,357	2,204	1,913	1,255	2
Ni	0,034	0,128	0,063	0,083	0,037	0,05
P	0,037	0,112	0,173	0,260	0,175	0,3
Pb	0,049	–	–	0,198	0,097	0,5
SO_4^{2-}	4,140	4,544	8,785	8,508	4,319	–
Si	0,137	0,170	1,717	0,430	0,221	5
Sr	0,037	0,054	0,095	0,082	0,036	5
Ti	0,004	0,008	0,032	0,011	0,005	10
Zn	0,049	0,075	0,287	0,108	0,053	1
Σ	10,33	14,33	37,35	25,56	12,27	

Примечание. Серым цветом выделены значения, превышающие ПДК для жилых зон.

Таблица 5

Концентрации суммарного белка ($\text{нг}/\text{м}^3$) в наземных пробах атмосферного воздуха, взятых в 2009 г. в различных точках г. Геленджика

Дата, время отбора проб	Место отбора проб			
	С	П	М	Л
2.07, 10:00–13:00	218	503	957	894
3.07, 10:00–13:00	1402	885	841	672
4.07, 10:00–13:00	903	1063	934	876
5.07, 10:00–13:00	1063	N.d.	N.d.	1618
5.07, 13:00–16:00	N.d.	N.d.	N.d.	585
5.07, 16:00–19:00	N.d.	N.d.	N.d.	1189
5.07, 19:00–22:00	N.d.	N.d.	N.d.	1369
5.07, 22:00–01:00	N.d.	N.d.	N.d.	1659
6.07, 01:00–04:00	N.d.	N.d.	N.d.	2361
6.07, 04:00–07:00	N.d.	N.d.	N.d.	1670
6.07, 07:00–10:00	N.d.	N.d.	N.d.	1148
6.07, 10:00–13:00	N.d.	894	1090	1455

Примечание. N.d. – нет данных.

Таблица 6

Концентрации суммарного белка ($\text{нг}/\text{м}^3$) в пробах атмосферного воздуха, взятых в ходе самолетного зондирования атмосферы в 2009 г. в районе г. Геленджика

Дата, время, высота пробоотбора, направление полета	5.07, 14:33–15:00, 2100 м, вдоль берега в Сочи	6.07, 12:46–13:01, 2000 м, перпендикулярно берегу	6.07, 13:36–13:49, 1500 м, перпендикулярно берегу	6.07, 13:36–13:49, 1000 м, перпендикулярно берегу	6.07, 14:44–15:12, 500 м, вдоль берега в Анапу
Концентрация	415	508	452	434	521

Среди частиц, обнаруживаемых на различных ступенях импактора, 60–80% имеют почвенное (там, где в больших количествах одновременно присутствуют O, Si и /или Al) или, вероятно, антропогенное (там, где присутствует большое количество различных металлов) происхождение. Частицы с большим содержанием Pb относятся, скорее всего, к выбросам различных транспортных средств, использующих топливо с добавками свинца, и к дорожной пыли. Обратим внимание на то, что анализ крупных частиц (десятки микрометров) выявил неоднородность химического состава частиц по объему. Об этом же свидетельствует присутствие углерода (возможно, относящегося к адсорбированным на поверхности органическим соединениям [34, 36, 37, 57, 58] в составе частиц почвенного и антропогенного происхождения, включая, вероятно, и аэрозоли, образовавшиеся в ходе приготовления пищи).

По данным микроскопического анализа особенно сложно определить массы биогенных компонентов атмосферного аэрозоля, поскольку вклад в них, кроме индивидуальных биогенных частиц, дают и адсорбционные слои на поверхности частиц. Химический анализ показал (см. табл. 5 и 6), что в исследованных образцах аэрозоля масса суммарного белка была от 0,22 до 2,4 мкг/м³. По данным табл. 1, это составляло от 2,5 до 10% полной массы аэрозоля. Указанные значения сопоставимы с опубликованными данными по содержанию биогенных компонентов в атмосферном аэрозоле [59, 60]. В период взятия проб в районе г. Геленджика в приземном слое атмосферы концентрация суммарного белка заметно превышала таковой на высотах 1000–2000 м, что свидетельствует о преобладающем вкладе локальных источников биоаэрозолей в наблюдаемые концентрации по сравнению с удаленными источниками. И поскольку суточный ход концентрации суммарного белка в приземном слое атмосферы выявил наличие ночного максимума (см. табл. 3), а ночью в условиях проведения наблюдений ветер был обычно направлен с суши на море (ночной бриз, см. рис. 2, а), можно сделать вывод, что основные источники суммарного

белка расположены не в море, а на суше. Здесь же отметим, что для Na и SO₄ ситуация обратная (см. табл. 3): днем, когда ветер дует с моря, их концентрации в атмосферном аэрозоле достигают максимума, что свидетельствует о преимущественно морском происхождении этих компонентов.

Так как в пробах аэрозоля не обнаружены в пределах чувствительности методов ни ПАУ, ни нефтепродукты, вклад в аэрозольные загрязнения различным транспортом невелик.

Концентрация жизнеспособных микроорганизмов в атмосферном аэрозоле региона тоже мала. В 75% проб атмосферного воздуха, взятых в наземных и надводной точках пробоотбора, обнаружены жизнеспособные микроорганизмы со средней концентрацией ~2000 КОЕ/м³; при этом концентрации в разных пробах отличались до 100 раз. Из шести высотных проб только в одной не обнаружены жизнеспособные микроорганизмы; в остальных их концентрации составляли от 2 до 200 КОЕ/м³. Такие значения, с одной стороны, характерны и для других регионов [47, 57–62], а с другой стороны, не представляют опасности для человека, если микроорганизмы не являются патогенными для него. Анализ генетического материала выросших колоний микроорганизмов показал, что среди примерно 40 идентифицированных изолятов (*Bacillus cereus* (штамм S1), *Bacillus megaterium* (штаммы CCM14B и M1Pca), *Bacillus subtilis* (штамм DSM 6405), *Bacillus anthracis* (штамм HCYL02) и др.) патогенных для человека нет. Более детальный анализ микроорганизмов в аэрозоле региона не входил в задачи наших исследований. Вследствие низких значений $q_{cp}/ПДК_{cc}$ для микроорганизмов они не включены в показатели ИЗА.

Исходя из экспериментально определенных величин концентраций контролируемых загрязнителей аэрозоля, по формуле (1) рассчитаны показатели ИЗА. Для возможности сравнения величин ИЗА, определяемых по различному количеству концентраций загрязнителей, в индекс включены только пять наибольших величин $q_{cp}/ПДК_{cc}$ для точки наблюдения «Лаборатория» (табл. 7). Рассматривая вместе данные,

Таблица 7

Индекс ИЗА (определен как сумма пяти наибольших значений) и его основные составляющие для различных веществ, входящих в состав аэрозольных частиц, и PM₁₀ в 2009 г. в районе г. Геленджика в точке наблюдения «Лаборатория»

Загрязнитель	ПДК _{сс} , мкг/м ³	Класс опасности c_i	Дата измерения			
			2.07	3.07	4.07	5.07
Al	30	2/1,3	0,00080	0,00040	0,00030	0,00070
Ba	4	1/1,7	0,00003	0,00001	0,00001	0,00003
Ca	20	2/1,3	0,12800	0,08600	0,09400	0,17400
Co	0,4	2/1,3	—	—	0,00780	0,01900
Cu	3	2/1,3	—	—	—	0,03450
K	50	2/1,3	0,0008	0,00060	0,00060	0,00150
Mg	1	2/1,3	0,2380	0,29300	0,12000	0,00290
Mn	50	3/1,0	0,0004	0,00030	0,00020	—
Na	100	3/1,0	0,0021	0,00680	0,00460	0,01750
SO ₄ ²⁻	20	3/1,0	0,1440	0,15900	0,11200	0,29900
Zn	50	2/1,3	—	—	—	0,00005
Белок	100	2/1,3	0,0011	0,00190	0,00170	0,00610
PM ₁₀	60			0,29300		0,25000
ИЗА (без PM ₁₀)			0,5132	0,54670	0,33840	0,53110

приведенные в табл. 2 и 7, легко заметить, что за время наблюдений значения ИЗА, рассчитанные для суммы газовых и аэрозольных загрязнений, не превышали единицу. Ни одно из отношений $q_{ср}/ПДК_{сс}$ также не приближается к единице. Основной вклад в ИЗА в этот период вносили газовые загрязнения атмосферы вместе с полной массой аэрозольных частиц. При этом $q_{ср}/ПДК_{сс} \leq 0,3$ для PM_{10} (см. табл. 2), тогда как сумма $q_{ср}/ПДК_{сс}$ для всех контролируемых загрязнителей примерно в 2 раза выше (см. табл. 7). С нашей точки зрения, это свидетельствует о том, что в России $ПДК_{сс}$ для PM_{10} завышена.

В идеальном случае $q_{ср}/ПДК_{сс}$ для PM_{10} и сумма $q_{ср}/ПДК_{сс}$ для всех контролируемых аэрозольных загрязнителей должны совпадать. Однако при изменении химического состава аэрозольных частиц сумма величин $q_{ср}/ПДК_{сс}$ для всех загрязнителей, контролируемых в аэрозоле, изменяется. Поэтому очевидно, что измерения $q_{ср}/ПДК_{сс}$ для всех контролируемых фракций аэрозоля более информативны, нежели $q_{ср}/ПДК_{сс}$ для PM_{10} (которую гораздо проще и дешевле измерять) и, следовательно, могут быть рекомендованы для более точной оценки качества атмосферного воздуха.

Для загрязнителей в аэрозольных частицах, чья концентрация измерялась в нескольких точках, можно по описанной выше методике построить поля загрязнений в районе исследований. В качестве примера на рис. 3 приведены поля загрязнений региона суммарным белком, входящим в состав аэрозоля. Видно, что 2 июля 2009 г. основные источники суммарного белка находились на суше, где его концентрация была гораздо больше, чем над водной поверхностью, тогда как 3 июля 2009 г. ситуация была прямо противоположной. Значит, в регионе присутствуют источники биоаэрозолей различной природы, а их мощность непостоянна. Аналогичные, а возможно, и более детальные заключения можно сделать по изменению во времени построенных полей загрязнений для других веществ.

После построения полей загрязнения региона отдельными веществами и усреднения их значений для определения среднесуточных концентраций можно рассчитать поля величин $q_{ср}/ПДК_{сс}$ для всех загрязнителей, контролируемых в аэрозоле, и рассчитать ИЗА для рассматриваемого региона для каждого из дней наблюдений. Пример таких изолиний поля ИЗА для загрязняющих веществ, входящих в состав аэрозоля, для территории и акватории г. Геленджика приведен на рис. 4.

Как следует из этого рисунка, качество атмосферного воздуха в регионе существенно зависит от точки наблюдений, изменяясь по индексу ИЗА до нескольких раз. Область максимальных загрязнений в зависимости от метеорологических условий перемещается по региону, хотя максимальное значение ИЗА для загрязнителей, входящих в состав аэрозолей, в период проведения исследований изменяется не сильно. Все это доказывает необходимость про-

ведения измерений загрязнителей атмосферы одновременно в нескольких точках для построения информативных карт, отражающих качество атмосферного воздуха в регионе.

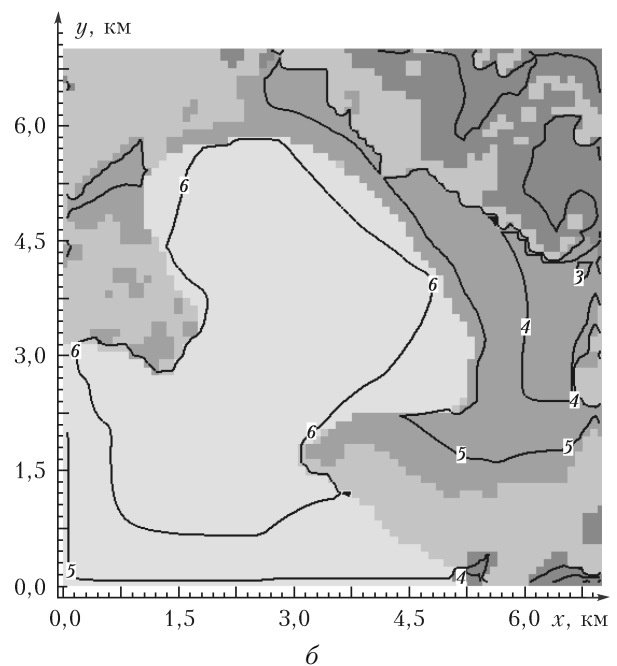
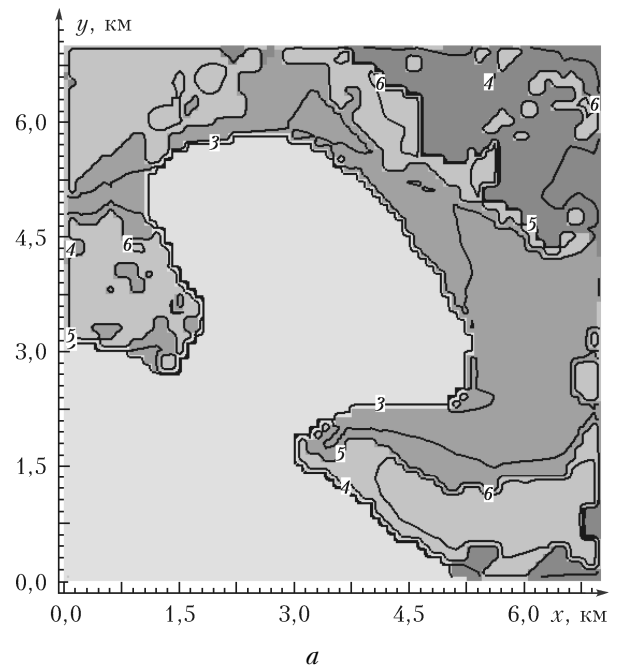


Рис. 3. Поля концентрации суммарного белка ($нг/м^3$) для 2.07.2009 г. с 10:00 до 13:00 (а) (значения изолиний: 3 – 10,0; 4 – 100,0; 5 – 1000,0; 6 – 2500,0) и для 3.07.2009 г. с 10:00 до 13:00 (б) (значения изолиний: 3 – 1,0; 4 – 10,0; 5 – 100,0; 6 – 1000,0): – водная поверхность, – растительность, – застройка, – свободное пространство (б)

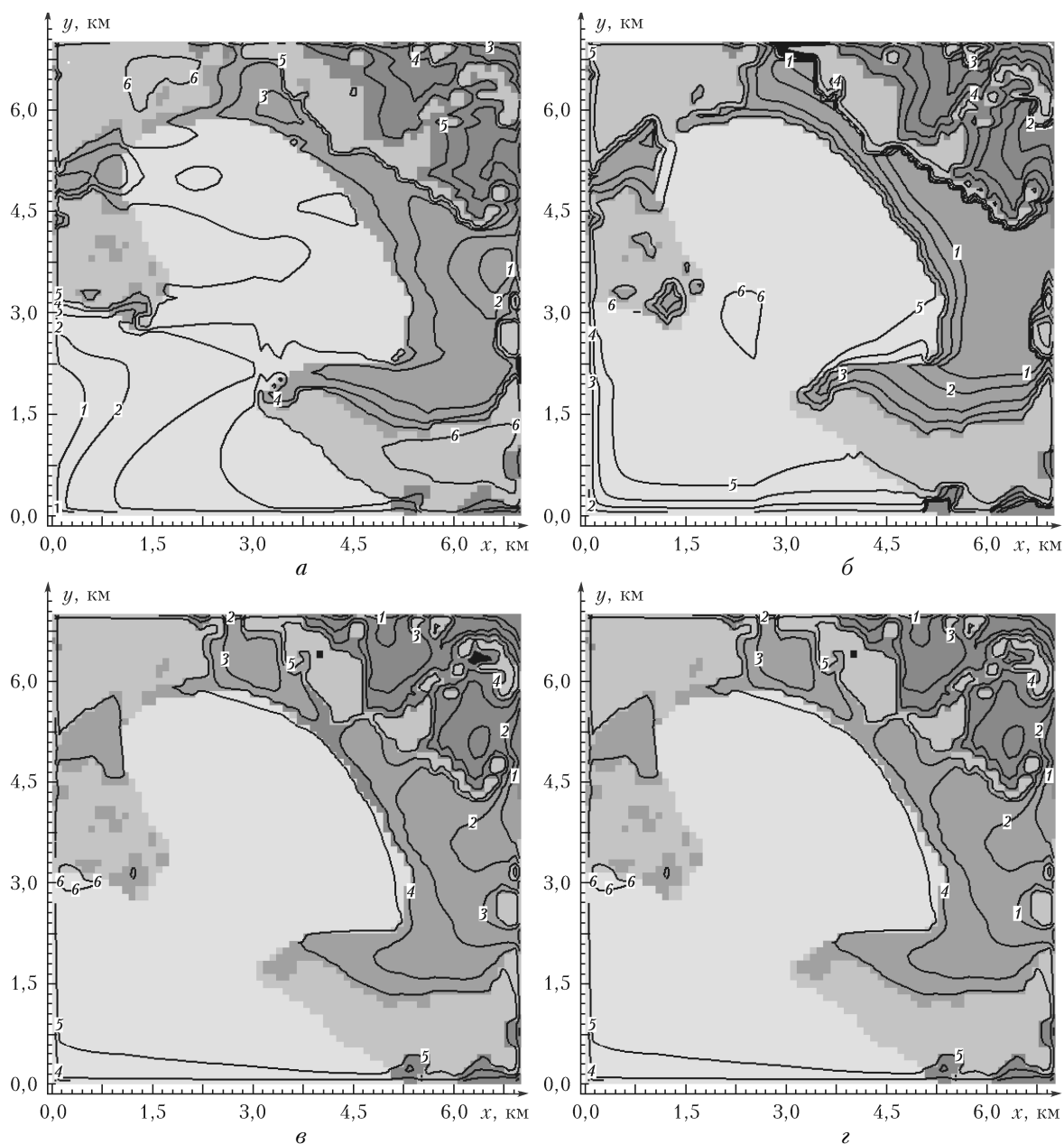


Рис. 4. Поля ИЗА для 2.07.2009 г. (а) (значения изолиний: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,05; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,6), 3.07.2009 г. (б) (значения изолиний: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,05; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,6), 4.07.2009 г. (в) (значения изолиний: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,05; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,4), 5.07.2009 г. (г) (значения изолиний: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,05; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,5): ■ – водная поверхность, ■ – растительность, ■ – застройка, ■ – свободное пространство

Заклучение

Проведенные исследования показали, что комплексная оценка качества атмосферного воздуха является сложной задачей. Даже непродолжительные исследования в г. Геленджике потребовали привлечение больших ресурсов: использования нескольких наземных (наводных) точек пробоотбора и самолетного зондирования атмосферы, большого разнообразия измерительного и пробоотборного оборудования, различных аналитических методик и математического моделирования процессов распространения аэрозолей в приземном слое атмосферы.

Определение концентраций различных загрязнителей как в газовой фазе, так и в составе аэрозолей позволило рассчитать комплексный показатель загрязнения атмосферы в одной точке проведения измерения и построить поля изменения этого индекса в регионе. Показано, что и на сам ИЗА, и на его распределение по региону существенное влияние оказывают метеорологические процессы. Предполагаемая связь концентраций различных загрязнителей в воздухе с их возможными источниками позволяет в будущем предпринять попытку построения прогноза ИЗА по прогнозируемой метеобстановке и антропогенной активности.

В период проведения исследований индексы ИЗА оказались невысокими как для комплекса газовых загрязнителей вместе с массой находящегося в воздухе аэрозоля, так и для комплекса загрязнителей, входящих в состав аэрозольных частиц. За это время не выявлено загрязнителей с концентрациями выше ПДК. Все это позволяет заключить, что в период проведения исследований Геленджик был экологически чистым городом с хорошим качеством атмосферного воздуха.

Авторы благодарят сотрудников Геленджикской зональной горно-лесной лаборатории за помощь в организации работ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 17-17-01095).

1. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. М.: Мир, 1980. 544 с.
2. Zhang Y.H., Hu M., Zhong L.J., Wiedensohler A., Liu S.C., Andreae M.O., Wang W., Fan S.J. Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): Overview // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, N 25. P. 6157–6173.
3. Balcilar I., Zararsiz A., Kalayci Y., Doğan G., Tuncel G. Chemical composition of Eastern Black Sea aerosol – preliminary results // *Sci. Total. Environ.* 2014. V. 488–489. P. 422–428. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.023.
4. Marć M., Tobiszewski M., Zabiegala B., de la Guardia M., Namieśnik J. Current air quality analytics and monitoring: A review // *Anal. Chim. Acta.* 2015. V. 853. P. 116–126. DOI: 10.1016/j.aca.2014.10.018.
5. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронецкая Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофанов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 1. Географические особенности и временная динамика // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 716–722.
6. Стародымова Д.П., Виноградова А.А., Шевченко В.П., Захарова Е.В., Сивонен В.В., Сивонен В.П. Элементный состав приземного аэрозоля у северо-западного побережья Кандалакшского залива Белого моря // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 11. С. 956–961; Starodymova D.P., Vinogradova A.A., Shevchenko V.P., Zakharova E.V., Sivonen V.V., Sivonen V.P. Elemental composition of near-ground aerosol near the Northwestern Coast of Kandalaksha Bay of the White Sea // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 181–186.
7. Monks P.S., Granier C., Fuzzie S., Stohl A., Williams M.L., Akimoto H., Amann M., Baklanov A., Baltensperger U., Bey I., Blake N., Blake R.S., Carslaw K., Cooper O.R., Dentenero F., Fowler D., Fragkou E., Frost G.J., Generoso S., Ginoux P., Grewe V., Guenther A., Hansson H.C., Henne S., Hjorth J., Hofzumahaus A., Huntrieser H., Isaksen I.S.A., Jenkin M.E., Kaiser J., Kanakidou M., Klimont Z., Kulmala M., Laj P., Lawrence M.G., Lee J.D., Lioussse C., Maione M., McFiggans G., Metzger A., Mieville A., Moussiopoulos N., Orlando J.J., O'Dowd C.D., Palmer P.I., Parrish D.D., Petzold A., Platt U., Pöschl U., Prévôt A.S.H., Reeves C.E., Reimann S., Rudich Y., Sellegri K., Steinbrecher R., Simpson D., ten Brink H., Theloke J., van der Werf G.R., Vautard R., Vestreng V., Vlachokostas C., von Glasow R. Atmospheric composition change – global and regional air quality // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43, N 33. P. 5268–5350.
8. Després V.R., Huffman J.A., Burrows S.M., Hoose C., Safatov A.S., Buryak G., Fröhlich-Nowoisky J., Elbert W., Andreae M.O., Pöschl U., Jaenicke R. Primary biological aerosols in the atmosphere: Observations and relevance // *Tellus B.* 2012. V. 64. P. 1–58. DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.15598.
9. Joy E.A., Horne B.D., Bergstrom S. Addressing air quality and health as a strategy to combat climate change // *Ann. Intern. Med.* 2016. V. 164, N 9. P. 626–627. DOI: 10.7326/M16-0507.
10. Larr A.S., Neidell M. Pollution and climate change // *Future Child.* 2016. V. 26, N 1. P. 93–113.
11. Pope C.A. III Mortality effects of longer term exposures to fine particulate air pollution: Review of recent epidemiological evidence // *Inhal. Toxicol.* 2007. V. 19, N 1. P. 33–38.
12. Gordon T. Linking health effects to PM components, size, and sources // *Inhal. Toxicol.* 2007. V. 19, N 1. P. 3–6.
13. Anderson H.R. Air pollution and mortality: A history // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43, N 1. P. 142–152.
14. Fang Y., Naik V., Horowitz L.W., Mauzerall D.L. Air pollution and associated human mortality: The role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 1377–1394. DOI: 10.5194/acp-13-1377-2013.
15. Kim K.-H., Kabir E., Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter // *Environ. Int.* 2015. V. 74. P. 136–143. DOI: 10.1016/j.envint.2014.10.005.
16. Brunekreef B., Maynard R.L. A note on the 2008 EU standards for particulate matter // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, N 26. P. 6425–6430.
17. Krzyzanowski M., Cohen A. Update of WHO air quality guidelines // *Air Qual. Atmos. Health.* 2008. V. 1. P. 7–13. DOI: 10.1007/s11869-008-0008-9.
18. Vahlning C., Smith K.R. Global review of national ambient air quality standards for PM₁₀ and SO₂ (24 h) // *Air Qual. Atmos. Health.* 2012. V. 5, N 4. P. 393–399.
19. Brunekreef B., Kunzli N., Pekkanen J., Annesi-Maesano I., Forsberg B., Sigsgaard T., Keuken M., Forastiere F., Barry M., Querol X., Harrison R. Clear air in Europe: Beyond the horizon? // *Eur. Respir. J.* 2015. V. 45. P. 7–10. DOI: 10.1183/09031936.00186114.
20. Kuklinska K., Wolska L., Namiesnik J. Air quality policy in the U.S. and the EU – a review // *Atmos. Pollut. Res.* 2015. V. 6, N 1. P. 129–137.
21. Qiao X., Jaffe D., Tang Y., Bresnahan M., Song J. Evaluation of air quality in Chengdu, Sichuan Basin, China: Are China's air quality standards sufficient yet? // *Environ. Monit. Assess.* 2015. V. 187, N 5. P. 250. DOI: 10.1007/s10661-015-4500-z.
22. РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М.: Госкомгидромет СССР, 1991. 693 с.
23. Review of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter: Policy Assessment of Scientific and – Technical Information – OAQPS Staff Paper // EPA, US. 1996. N EPA-452/R-96-013. URL: <https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/data/1996pmstaffpaper.pdf> (last access: 13.11.2017).
24. Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Смышляев С.П., Моцаков М.А. Озон над Санкт-Петербургом: сопоставление экспериментальных и модельных данных // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 1. С. 20–26; Timofeyev Yu.M., Virolainen Ya.A., Smyshlyayev S.P., Motsakov M.A. Ozone over St.Petersburg: Comparison of experimental data and numerical simulation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 3. P. 263–268.
25. Reich B.J., Fuentes M., Burke J. Analysis of the effects of ultrafine particulate matter while accounting for

- human exposure // *Environmetrics*. 2008. V. 20, N 2. P. 131–146.
26. *Helleburst S., Allanic A., O'Connor I.P., Jourdan C., Healy D., Sodeau J.R.* Sources of ambient concentrations and chemical composition of PM_{2.5-0.1} in Cork Harbour, Ireland // *Atmos. Res.* 2010. V. 95, N 2–3. P. 136–149.
 27. *Spindler G., Brüggemann E., Gnauk T., Grüner A., Müller K., Herrmann H.* A four-year size-segregated characterization study of particles PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ depending on air mass origin at Melpitz // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44, N 2. P. 164–173.
 28. *Quiency P., Butterfield D.* Ambient air particulate matter PM₁₀ and PM_{2.5}: Developments in European measurement methods and legislation // *Biomarkers*. 2009. V. 14, N 1. P. 34–38.
 29. *Порядин А.Ф., Хованский А.Д.* Оценка и регулирование качества окружающей природной среды. М.: НУМЦ Минприроды России, ИД Прибой, 1996. 350 с.
 30. *ГОСТ 17.2.1.03-84.* Охрана природы. Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения. М.: Изд-во стандартов, 1984. 12 с.
 31. *ГН 2.1.6.1338-03.* Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. М.: СТК Аякс, 2003. 84 с.
 32. *ГН 2.1.6.2604-10.* Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Доп. 8 к ГН 2.1.6.1338-03. Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 5 с.
 33. *Bardouki H., Liakakou H., Economou C., Sciare J., Smolik J., Ždimal V., Eleftheriadis K., Lazaridis M., Dye C., Mihalopoulos N.* Chemical composition of size-resolved atmospheric aerosols in the Eastern Mediterranean during summer and winter // *Atmos. Environ.* 2003. V. 37, N 2. P. 195–208.
 34. *Kroll J.H., Seinfeld J.H.* Chemistry of secondary organic aerosol: Formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, N 16. P. 3593–3624.
 35. *Brook J.R., Demerjian K.L., Hidy G., Molina L.T., Pennell W.T., Scheffe R.* New directions: Results-oriented multi-pollutant air quality management // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 43, N 12. P. 2091–2093.
 36. *Zelenyuk A., Ezell M.J., Perraud V., Johnson S.N., Bruns E.A., Yu Y., Imre D., Alexander M.L., Finlayson-Pitts B.J.* Characterization of organic coatings on hygroscopic salt particles and their atmospheric impacts // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44, N 9. P. 1209–1218.
 37. *Pöschl U.* Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects // *Angew. Chem.* 2005. V. 44, N 46. P. 7520–7540.
 38. *Boobis A., Budinsky R., Collie S., Crofton K., Embry M., Felter S., Hertzberg R., Kopp D., Mihlan G., Muntaz M.M., Price P., Solomon K., Teuschler L., Yang R., Zaleski R.* Critical analysis of literature on low-dose synergy for use in screening chemical mixtures for risk assessment // *Crit. Rev. Toxicol.* 2011. V. 41, N 5. P. 369–383.
 39. *Как организовать общественный экологический мониторинг.* Руководство для общественных организаций / под ред. М.В. Хотулевой. М., 1997. 256 с.
 40. *Ankilov A., Baklanov A., Colhoun M., Enderle K.-H., Gras J., Julianov Yu., Kaller D., Lindner A., Lushnikov A.A., Mavliev R., McGovern F., Mirme A., O'Connor T.C., Podzimek J., Preining O., Reischl G.P., Rudolf R., Sem G.J., Szymanski W.W., Tamm E., Vrtala A.E., Wagner P.E., Winklmayr W., Zagaynov V.* Intercomparison of number concentration measurements by various aerosol particle counters // *Atmos. Res.* 2002. V. 62, N 3–4. P. 177–207.
 41. *Фильтры АФА.* Каталог-справочник. М.: Атомиздат, 1970. 43 с.
 42. *РД 52.04.333-93.* Хроматографический метод определения содержания хлоридов, нитратов, сульфатов, лития, натрия, аммония и калия в атмосферных осадках. М.: Государственный комитет РФ по гидрометеорологии, 1993. 13 с.
 43. *You W.W., Haugland R.P., Ryan D.K., Haugland R.P.* 3-(4-Carboxybenzoyl)quinoline-2-carboxaldehyde, a reagent with broad dynamic range for the assay of proteins and lipoproteins in solution // *Anal. Biochem.* 1997. V. 244, N 2. P. 277–282.
 44. *РД 52.44.589-97.* Определение массовой концентрации приоритетных полициклических ароматических углеводородов в атмосферном воздухе. Методика выполнения измерений методом обращенной жидкостной хроматографии. М.: Институт глобального климата и экологии, 1997.
 45. *РД 52.24.476-2007.* Массовая концентрация нефтепродуктов в водах. Методика выполнения измерений ИК-фотометрическим методом. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2007. 33 с.
 46. *Lang-Yona N., Lehahn Y., Herut B., Burshtein N., Rudich Y.* Marine aerosol as possible source for endotoxins in coastal areas // *Sci. Total Environ.* 2014. V. 499. P. 311–318. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.08.054.
 47. *Сергеев А.Н., Сафатов А.С., Агафонов А.П., Андреева И.С., Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Буряк Г.А., Генералов В.М., Захарова Ю.Р., Лантева Н.А., Олькин С.Е., Панченко М.В., Парфенова В.В., Резникова И.К., Симоненков Д.В., Теплякова Т.В., Терновой В.А.* Сравнение присутствия химических и биологических маркеров в поверхностном микрослое воды акваторий курортных зон оз. Байкал и в атмосферном аэрозоле этого региона // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 6. С. 585–594; *Sergeev A.N., Safatov A.S., Agafonov A.P., Andreeva I.S., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Buryak G.A., Generalov V.M., Zakharova Yu.R., Lapteva N.A., Ol'kin S.E., Panchenko M.V., Parfenova V.V., Reznikova I.K., Simonenkov D.V., Teplyakova T.V., Ternovoi V.A.* Comparison of the presence of chemical and biomarkers in the surface microlayer in water areas of health resort zones of Lake Baikal and in atmospheric aerosol of this region // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 4. P. 467–477.
 48. *Десятков Б.М., Сарманаев С.Р., Бородулин А.И.* Численно-аналитическая модель переноса аэрозолей в термически стратифицированном пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 1996. Т. 9, № 6. С. 815–820.
 49. *Бородулин А.И., Десятков Б.М., Ярыгин А.А.* Модель распространения атмосферных примесей в пограничном слое атмосферы. Программа для ЭВМ. 2006. Зарегистрирована Федеральным Институтом промышленной собственности РОСПАТЕНТа. Рег. номер 2007610293. 16 января 2007 г.
 50. *Десятков Б.М., Лантева Н.А.* Метод построения оптимальной сети станций мониторинга выбросов газов и аэрозолей // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 4. С. 354–359.
 51. *Kopanakis I., Eleftheriadis K., Mihalopoulos N., Lydakis-Simantiris N., Katsivela E., Pentari D., Zampas P., Lazaridis M.* Physico-chemical characteristics of particulate matter in the Eastern Mediterranean // *Atmos. Res.* 2012. V. 106. P. 93–107. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.11.011.
 52. *Koulouri E., Saarikoski S., Theodosi C., Markaki Z., Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Makela T., Hillamo R.,*

- Mihalopoulos N.* Chemical composition and sources of fine and coarse aerosol particles in the Eastern Mediterranean // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, N 26. P. 6542–6550.
53. *Querol X., Alastuey A., Pey J., Cusak M., Pérez N., Mihalopoulos M., Theodosi C., Gerasopoulos E., Kubilay N., Kozak M.* Variability in regional background aerosols within the Mediterranean // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 14. P. 4575–4591.
54. *Adachi K., Buseck P.R.* Changes in shape and composition of sea-salt particles upon aging in an urban atmosphere // *Atmos. Environ.* 2015. V. 100. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.036.
55. *Zieliński T.* Studies of aerosol physical properties in coastal area // *Aerosol Sci. Technol.* 2004. V. 38, N 5. P. 513–524.
56. *Perrino C., Canepi S., Catrambone M., Dalla Torre S., Rantica E., Sargolini T.* Influence of natural events on the concentration and composition of atmospheric particulate matter // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43, N 31. P. 4766–4779.
57. *Aerosols – Science and Technology* / I.E. Agranovski (ed.). Wienheim: Wiley-VCH, 2010. 463 p.
58. *Bates T.S., Quinn P.K., Frossard A.A., Russell L.M., Hakala J., Petäjä T., Kulmala M., Covert D.S., Capra C.D., Li S.-M., Hayden K.L., Nuaaman I., McLaren R., Massoli P., Canagaranta M.R., Onasch T.B., Sueper D., Worsnop D.R., Keene W.C.* Measurements of ocean derived aerosol off the coast of California // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, N D21. P. D00V15. DOI: 10.1029/2012JD017588.
59. *Tong Y., Lighthart B.* Diurnal distribution of total and culturable atmospheric bacteria at a rural site // *Aerosol Sci. Technol.* 1999. V. 30, N 2. P. 246–254.
60. *Tong Y., Lighthart B.* The annual bacterial particle concentration and size distribution in the ambient atmosphere in a rural area of the Willamette Valley, Oregon // *Aerosol Sci. Technol.* 2000. V. 32, N 5. P. 393–403.
61. *Сафатов А.С., Теплякова Т.В., Белан Б.Д., Буряк Г.А., Воробьева И.Г., Михайловская И.Н., Панченко М.В., Сергеев А.Н.* Концентрация и изменчивость состава микроицетов в атмосферном аэрозоле юга Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 9. С. 901–907; *Safatov A.S., Teplyakova T.V., Belan B.D., Buryak G.A., Vorob'eva I.G., Mikhailovskaya I.N., Panchenko M.V., Sergeev A.N.* Atmospheric aerosol fungi concentration and diversity in the South of Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 1. P. 73–80.
62. *Burrows S.M., Elbert W., Lawrence M.G., Pöschl U.* Bacteria in the global atmosphere – Part 1: Review and synthesis of literature data for different ecosystems // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 23. P. 9263–9280.

A.S. Safatov, A.P. Agafonov, M.Yu. Arshinov, A.M. Baklanov, B.D. Belan, G.A. Buryak, A.V. Fofonov, V.M. Generalov, A.S. Kozlov, N.A. Lapteva, S.B. Malyshkin, Yu.V. Marchenko, S.E. Olkin, I.K. Reznikova, A.N. Sergeev, D.V. Simonenkov, V.A. Ternovoi, Yu.V. Tumanov, V.P. Shmargunov. **Complex assessment of atmospheric air quality in the city of Gelendzhik.**

Atmospheric air quality is determined by the concentrations of some gaseous pollutants and mass concentrations of aerosol particles in different size ranges. A wide range of atmospheric pollutants in both gaseous and aerosol phases was studied in the vicinity of Gelendzhik simultaneously in several sites of the region and at altitudes of up to 2200 m in July 2009. No such complex experiment was conducted there before. The following characteristics of the atmospheric aerosol were studied in the partial size range 3 nm – 32 μm: elemental composition of particles (23 chemical elements) and concentrations of polyaromatic hydrocarbons (14 compounds), unsaturated hydrocarbons, total protein, biotoxins, and culturable microorganisms. The concentration fields of different air pollutants and the integrated air pollution index were constructed using mathematical models of pollutant propagation and data on the hydrometeorological conditions during the period of measurements. The sources of aerosols in the region were revealed by studying the chemical composition of the airborne particles. The data obtained allowed us to estimate air pollutants and to calculate air quality indexes for the Gelendzhik area. The daily average concentrations of all the pollutants were compared to the daily average maximum permissible concentrations. All these concentrations were less than appropriate values of daily average maximum permissible concentrations. The integrated air pollution index did not exceed 1. Consequently, the atmosphere in the vicinity of Gelendzhik did not contain any significant pollutants in that period.