

Научная статья

УДК 551.432.8:504.3

DOI 10.37724/RSU.2023.80.3.017

Опыт анализа влияния равнинного рельефа на течения воздуха в пограничном слое атмосферы (по данным экспедиционного радиозондирования)

Сергей Анатольевич Тобратов¹, Ольга Сергеевна Железнова², Ольга Сергеевна Костикова³, Юлия Николаевна Шилкина⁴

^{1, 2, 3, 4} Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина, Рязань, Россия

¹ tobratovsa@mail.ru

² o.zheleznova@365.rsu.edu.ru

³ olg.kostikowa@yandex.ru

⁴ yu.shilckina@yandex.ru

Аннотация. На примере ландшафтов центра Рязанской области (граница Среднерусской возвышенности, Мещерской низменности и Окско-Донской равнины, трассируемая поймой Оки) рассмотрены особенности, масштабы, факторы и потенциальное экологическое значение трансформации приземных воздушных потоков морфоструктурами равнинного рельефа. Исследование выполнено на базе эмпирических данных, полученных при экспедиционном радиозондировании, в противовес более распространенному подходу — математическому моделированию динамики атмосферы, дающему малодостоверные результаты в связи с принципиальным несовершенством применяемых расчетных схем. Проведены 2 серии запусков радиозондов, характеризующих погодные условия разной степени благоприятности для проявления атмосферно-геоморфологических взаимосвязей. Наиболее информативной была 2-я серия запусков (11–12 апреля 2023 года), когда данным взаимосвязям благоприятствовали малоградиентное барическое поле, адвекция тепла с юго-востока, наличие приподнятой и приземной инверсий и генетические различия воздушных масс на разных высотах. Установлено, что линейменты (пойменные сужения и долины притоков Оки) и внутриводораздельные структуры (останцы надпойменных террас) не только и не столько тормозят, сколько канализируют воздушные потоки и формируют устойчивые местные траектории воздушных масс, причем их влияние закономерно меняется с высотой в соответствии с их морфологией, абсолютной высотой и ориентировкой в пространстве относительно векторов сил, действующих в атмосфере. Установлено также, что масштабы и направленность влияния рельефа на воздушные течения определяются циркуляционным фактором и меняются вслед за изменением сочетаний центров действия атмосферы синоптического масштаба. Определено, что верхний рубеж пограничного слоя атмосферы наиболее целесообразно ассоциировать с первым с поверхности блокирующим слоем (зоной снижения вертикальных температурных градиентов), причем информативным индикатором экологической и циркуляционной роли данного слоя служит вертикальное распределение относительной влажности, фиксируемое в ходе радиозондирования.

Ключевые слова: атмосферная миграция токсикантов, морфоструктуры, останцы надпойменных террас, пограничный слой атмосферы, пойма Оки, радиозондирование, рельеф Русской равнины.

Для цитирования: Тобратов С. А., Железнова О. С., Костикова О. С., Шилкина Ю. Н. Опыт анализа влияния равнинного рельефа на течения воздуха в пограничном слое атмосферы (по данным экспедиционного радиозондирования) // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2023. № 3 (80). С. 169–189. DOI: [10.37724/RSU.2023.80.3.017](https://doi.org/10.37724/RSU.2023.80.3.017).

Analysis of influence of lowland relief on air currents in the atmospheric boundary layer (based on radio sounding data)

Sergey Anatolyevich Tobratov¹, Olga Sergeevna Zheleznova², Olga Sergeevna Kostikova³,
Yulia Nikolayevna Shilckina⁴

^{1, 2, 3, 4} Ryazan State University named for S. A. Yesenin, Ryazan, Russia

¹ tobratovsa@mail.ru

² o.zheleznova@365.rsu.edu.ru

³ olg.kostikowa@yandex.ru

⁴ yu.shilckina@yandex.ru

Abstract. The paper describes the landscapes of central Ryazan Region (the border of the Central Russian Upland, the Meshchera Lowland and the Oka-Don Plain, traced by the Oka floodplain), including the features, scaling, certain factors and potential ecological significance of changes in surface air flows due to morphostructures of the plain relief. The research employed data obtained during expeditions with radio sounding, as opposed to a more frequent method of mathematical modeling of atmospheric dynamics. The latter often yields unreliable results, due to inherent faults of the calculation schemes applied. We have launched two groups of radiosondes, considering weather conditions in a wide range of manifestations of atmospheric and geomorphological relationships. The second series of launches on the 11–12 of April, 2023 provided the most important data, as the low-gradient baric field was favorable due to heat advection from the southeast, higher and surface inversions, and genetic differences in air masses at different heights. We have established that lineaments (floodplain narrowings and valleys of tributaries of the Oka river) and intra-floodplain structures (remnants of floodplain terraces) do not only slow down air flows, but also channel them to form stable local trajectories of air masses, and their influence naturally changes at different heights in accordance with their morphology, the absolute height and orientation in space relative to the vectors of atmospheric forces. It is established that the scale and direction of the influence of the relief on air currents are determined by the circulation factor and change following the change in combinations of centers of atmospheric influence on a synoptic scale. This shows that it is most expedient to associate the upper boundary of the atmospheric boundary layer with the blocking layer next to the surface (the zone of decreasing vertical temperature gradients), and the vertical distribution of relative humidity recorded during radio sounding serves as an important indicator of the ecological and circulatory role of this layer.

Keywords: atmospheric migration of toxicants, morphostructures, remnants of floodplain terraces, atmospheric boundary layer, River Oka floodplain, radio sounding, topography of the Russian Plain.

For citation: Tobratov S. A., Zheleznova O. S., Kostikova O. S., Shilckina Yu. N. Analysis of influence of lowland relief on air currents in the atmospheric boundary layer (based on radio sounding data). *The Bulletin of Ryazan State University named for S. A. Yesenin*. 2023; 3 (80):169–189. (In Russ.). DOI: 10.37724/RSU.2023.80.3.017.

Введение

Загрязнение приземного воздуха — важнейшая характеристика качества окружающей среды, что особенно актуально для староосвоенных регионов Центра России. Кроме того, атмосферные выпадения являются основным входным потоком вещества в зональных (водораздельных) экосистемах и непосредственно влияют на параметры их геохимической устойчивости. В этой связи приобретает актуальность задача формализации воздушной миграции токсикантов для более глубокого понимания, адекватного прогноза и картирования миграционных процессов.

Однако и в XXI веке, несмотря на успехи математического описания и моделирования природных процессов, мы еще далеки от познания такой динамичной физической среды, как атмосфера. В частности, зависимость воздушных потоков от неоднородностей подстилающей поверхности — вопрос, наименее разработанный современной теорией атмосферной диффузии. В данной теории равнинный рельеф и тем более растительный покров признаются незначимыми факторами, что приводит к огромным расхождениям расчетных и измеренных параметров загрязнения, о чем многократно упоминается в научной литературе (см., напр.: [Бызова, Гаргер, Иванов, 1991 ; Замай, Якубайлик, 1998 ; Ступин, Оверко, 2006 ; Леженин, Ярославцева, Рапута, 2016]) (рис. 1).

результаты снегосъемок и почвенных опробований, проводимых нами с 2006 года, в ходе которых установлено определяющее влияние рельефа на атмосферный перенос загрязняющих веществ от Рязани и иных техногенных источников [Кривцов, Тобратов, Водорезов, Комаров, Железнова, Соловьева, 2011 ; Тобратов, Железнова, Поклонов, Кадыров, 2022]. При этом роль геоморфологического фактора оказалась столь важной, что вещества самого разного происхождения и химических свойств (чернобыльский радиоцезий, свинец, техногенные карбонаты и др.) оказались сходными по распределению в почвах и снежном покрове. Установлено, что в регионе существуют устойчивые пути воздушной миграции загрязняющих веществ и территории, в разной степени подверженные их воздействию (рис. 2). Траектории воздушной миграции токсикантов зависят не столько от розы ветров, сколько от ландшафтных факторов, из которых *рельеф является основным, а растительный покров (лесные массивы) — дополнительным* в связи с меньшей высотой растений в сравнении с геоморфологическими неоднородностями. Однако устойчивость таких траекторий во времени и погодные обстановки, наиболее благоприятные проявления для атмосферно-геоморфологических взаимосвязей нам пока неизвестны и нуждаются в экспериментальном обосновании.

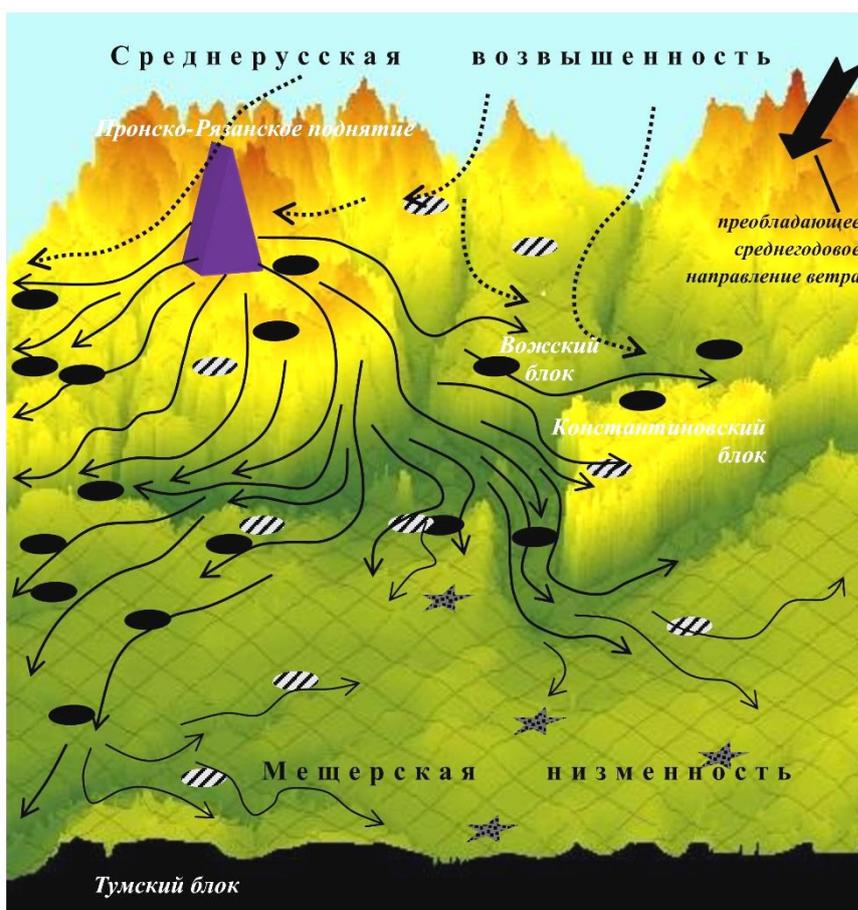


Рис. 2. Трехмерная модель атмосферной миграции загрязняющих веществ в центре Рязанской области в зависимости от условий рельефа (приводится по: [Тобратов, Железнова, Поклонов, Кадыров, 2022])

Примечание:

- — территории с максимальной техногенной трансформацией почв и снежного покрова;
- ◐ — территории с активными, но незавершенными процессами геохимической эволюции почв;
- ★ — территории с условиями, максимально близкими к фоновым (минимально подверженные аэральному загрязнению);

Показана локализация основного источника загрязнения — Южного промузла Рязани.

При этом основной перенос техногенных продуктов осуществляется в пределах пограничного слоя атмосферы (далее — ПСА), который включает нижние слои тропосферы, испытывающие непосредственное термическое и динамическое воздействие неоднородностей земной поверхности (в первую очередь геоморфологических). Под влиянием трения ветер в ПСА снижает скорость и отклоняется от геострофического течения (присущего свободной тропосфере) влево на 10–40° в зависимости от степени шероховатости поверхности (чем ближе к поверхности,

тем больше отклонение); с высотой сила трения плавно снижается, и ветер, отклоняясь вправо от приземного направления, возвращается к геострофическому. Правый поворот ветра с высотой — экмановская спираль — является характерной динамической чертой ПСА.

Несмотря на влияние трения, порождаемого горизонтально неоднородной земной поверхностью, воздушные потоки в пределах ПСА могут обеспечивать дальнюю атмосферную миграцию загрязняющих веществ и примесей природного происхождения. Об этом, в частности, свидетельствуют исследования и расчетные оценки миграции чернобыльских радионуклидов, продуцировавшихся аварийным 4-м энергоблоком Чернобыльской АЭС в период с 26 апреля по 6 мая 1986 года (когда, наконец, удалось добиться блокировки ядерных реакций и горения графита). Выполненное специалистами Института глобального климата и экологии (ИГКЭ имени Ю. А. Израэля) решение «обратной задачи» — реконструкции объема эмиссии и условий рассеяния радионуклидов на основе данных о фактическом загрязнении почвенного покрова — позволило установить, что основной перенос радиоактивных газов и аэрозолей (особенно после 28 апреля 1986 года) осуществлялся вблизи изобарической поверхности 925 гПа — в динамической части ПСА [Израэль, Де Корт, Джонес, Квасникова [и др.], 1998], причем данный перенос носил макрорегиональный характер (рис. 3), на некоторых траекториях приближающийся к глобальному.

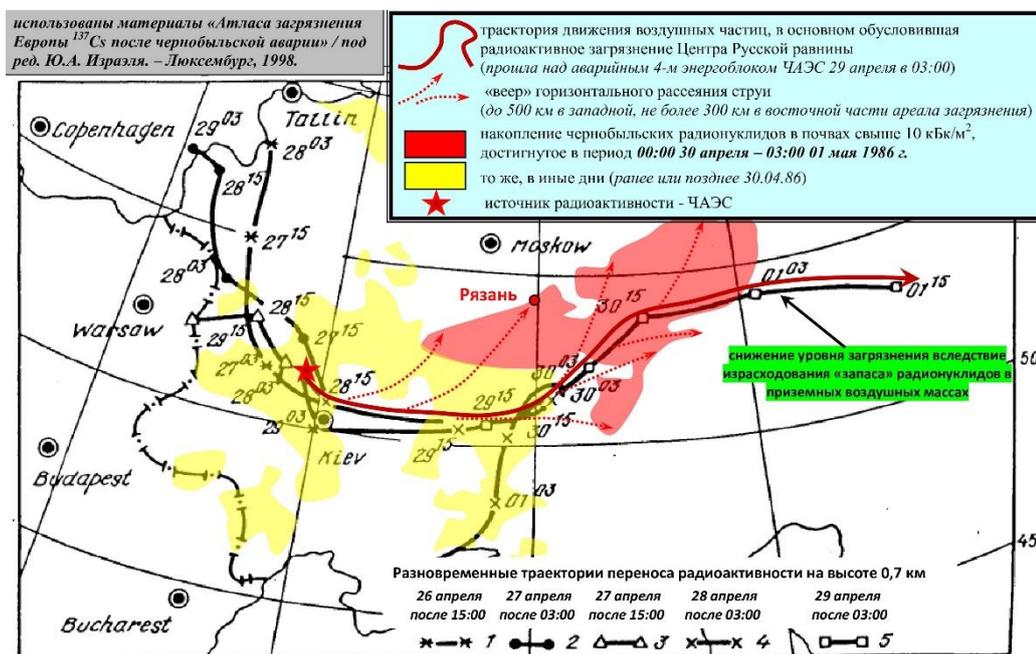


Рис. 3. Авария на ЧАЭС 26 апреля — 6 мая 1986 года — «эксперимент-катастрофа», источник данных об особенностях миграции техногенных элементов в пограничном слое атмосферы (составлено по результатам исследований ИГКЭ [Израэль, Де Корт, Джонес, Квасникова [и др.], 1998] и онлайн-данным [Чернобыль])

Среднестатистическая высота ПСА, определяемая расчетным путем, как правило, колеблется в интервале 1,5–2 км, однако подобные расчеты обычно проводятся для однородной поверхности и прямолинейных изобар. При этом ПСА трактуется прежде всего как «слой трения», а его верхняя граница, как правило, не имеет строгих критериев — обычно она рассматривается как условная поверхность, где какие-либо фазовые рубежи отсутствуют, лишь скорость и направление ветра становятся геострофическими. Существенно меньшее число авторов рассматривает первую от поверхности приподнятую инверсию в качестве естественного ограничителя ПСА [Айдосов, Айдосов, Заурбеков, 2018], что, по нашему мнению, является более продуктивным подходом. В этом случае ПСА предстает в качестве автономного атмосферного образования со своими закономерностями циркуляции и миграции вещества, причем для того чтобы покинуть данный слой, веществам поверхностного происхождения необходимо быть вовлеченными в особенно мощные вертикальные потоки. Данный подход, на наш взгляд, позволяет адекватно оценить автономность и экологическую функцию ПСА, не подменяя реальность результатами расчетов с не всегда верно заданными граничными условиями.

Основная часть

Материалы и методы

Основной гипотезой исследования было существенное влияние конфигурации поймы Оки и внепойменных возвышенных и сниженных геоморфологических элементов на направление и скорость воздушных потоков в ПСА, а также на протекание неблагоприятных для самоочищения атмосферы синоптических процессов.

Исследования проводились в окрестностях города Рязани, приуроченных к контрастному геоморфологическому рубежу — границе северных отрогов Среднерусской возвышенности и Мещерской низины (рис. 4). Данную границу трассирует и делает еще более контрастной пойма Оки, также внутренне неоднородная (чередование суженных и расширенных участков, зон меандрирования и прямолинейных фрагментов русла, имеются также зоны пойменной трансгрессии, останцы первой и второй террас, занятые населенными пунктами и лесными массивами, и т. д.). При этом пойменные расширения выступают аттракторами линий токов, что, как правило, приводит к расходимости токов, замедлению воздушных течений и выпадению веществ, транспортируемых атмосферой, на поверхность почвы; русловые и старичные понижения облегчают воздушные переносы внутри поймы, а внутрипойменные останцы, наоборот, тормозят и отклоняют ветровые потоки. Основные морфоструктуры, способные повлиять на динамику приземной атмосферы, указаны на рисунке 4. Пункты запуска радиозондов выбирались, исходя из условий возможного влияния геоморфологических элементов на воздушные потоки.

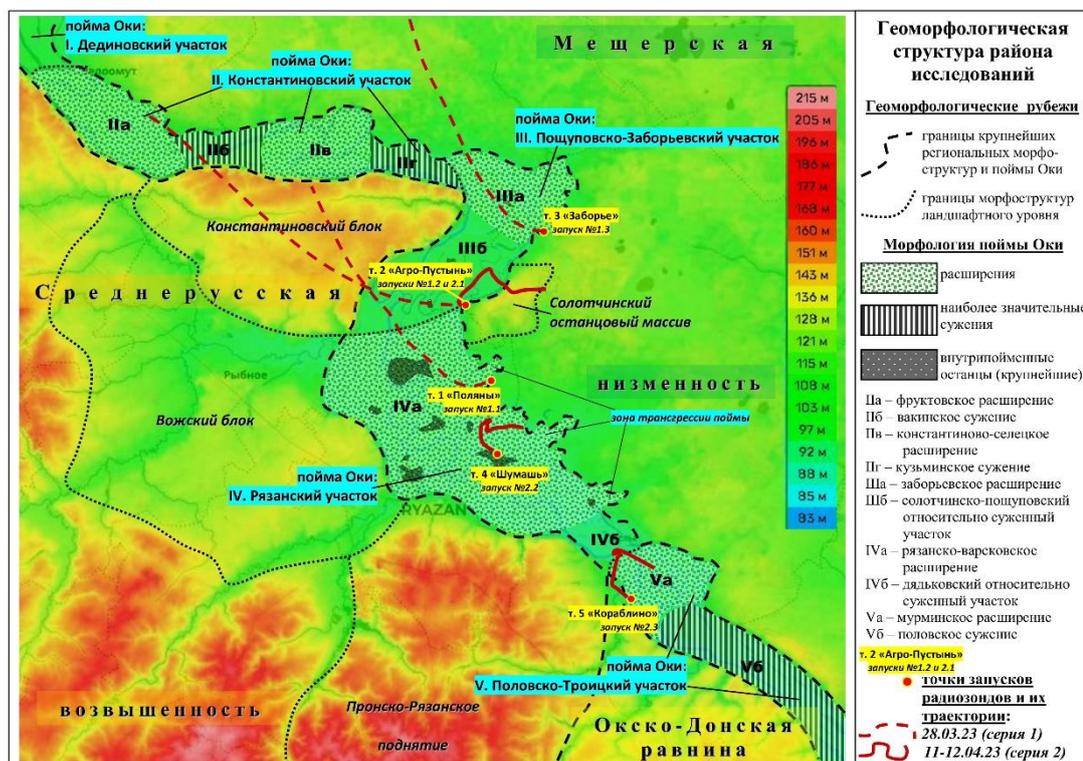


Рис. 4. Основные геоморфологические неоднородности, оказывающие влияние на траектории воздушных переносов в районе исследований

Для экспедиционных исследований динамики ПСА применялся метод радиозондирования. Он позволяет получить информацию о влиянии неоднородностей рельефа на воздушные потоки при помощи непосредственных измерений; такие результаты имеют большую ценность по сравнению с расчетами по распространенным в настоящее время моделям. Использовались радиозонды МРЗ-Н1 «Радий», применяемые на российских аэрологических станциях. Для фиксации показаний применялся радиосканирующий RTL-SDR приемник, настроенный на частоту 403 МГц, с авторским программным обеспечением, разработанным в Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (рис. 5). Приемная станция фиксирует географические координаты зонда, абсолютную высоту, температуру и относительную влажность воздуха и обеспечивает их запись в файл стандартного обменного формата *.txt. Дальность действия радиостанции — не менее 25 км по горизонтали и 3,5 км по вертикали.

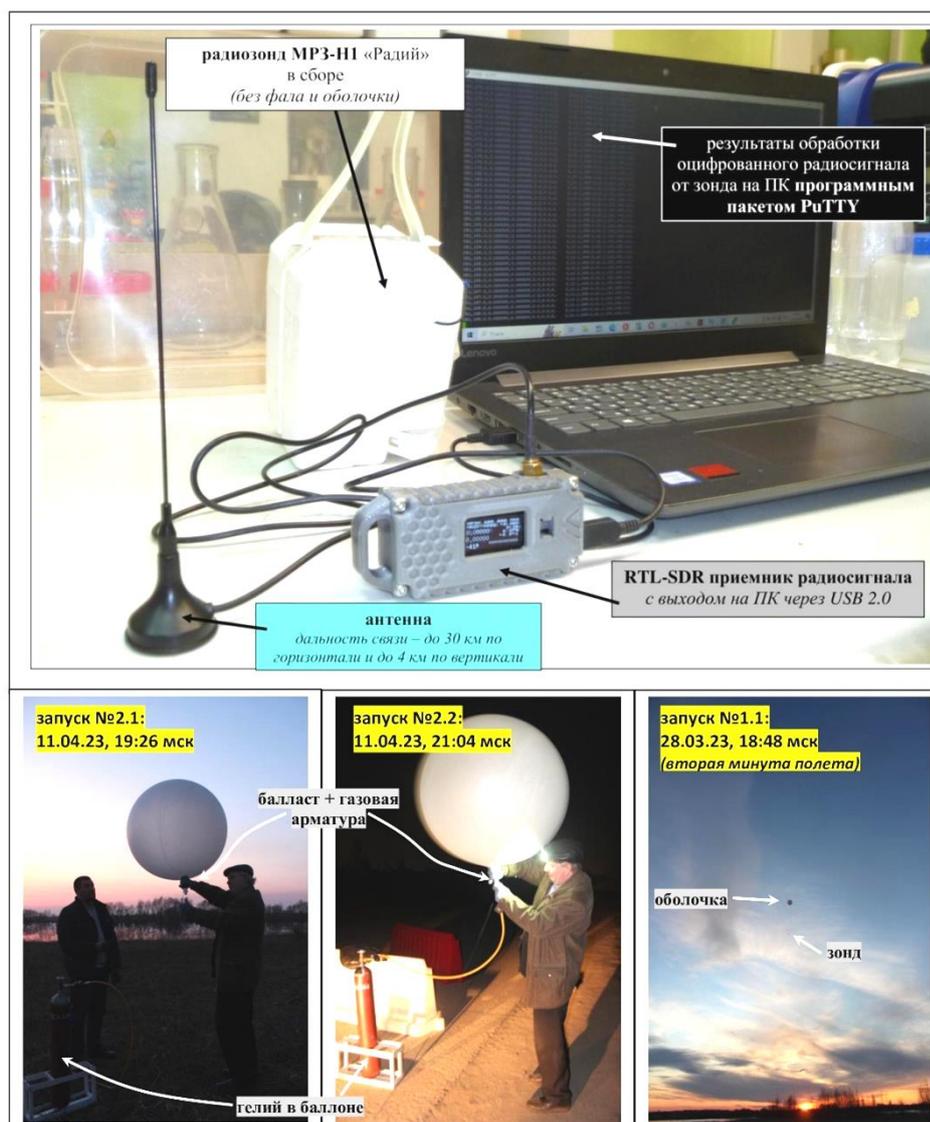


Рис. 5. Оборудование для экспедиционного радиозондирования и процесс запуска зондов

Примечание: запуски осуществлялись в вечернее и ночное время для оценки влияния ночной приземной инверсии выхолаживания на динамические процессы в атмосфере.

Осуществлено 2 серии запусков радиозондов — 28 марта и 11 апреля 2023 года — в контрастных условиях влияния рельефа на приземные воздушные потоки. Примечательно, что в обоих случаях в центре Рязанской области господствовали юго-восточные ветра, однако различалась и скорость ветра, и генезис барических систем, порождающих горизонтальный обмен. Первая (мартовская) серия характеризовала метеоусловия, наименее благоприятные для влияния рельефа на конфигурацию воздушных потоков в ПСА: высокие барические градиенты, значительная скорость ветра, неустановившиеся погодные условия с тенденцией к росту циклоничности, значительные горизонтальный и вертикальный обмен (рис. 6). Вторая серия запусков, наоборот, была предпринята в антициклональных условиях при выраженной адвекции тепла с юго-востока, слабом приземном ветре и благоприятных условиях для ночного выхолаживания (рис. 7). При этом на воздушные потоки могли влиять даже небольшие неоднородности поверхности, а сниженный вертикальный обмен благоприятствовал накоплению веществ местного происхождения в приземной атмосфере.

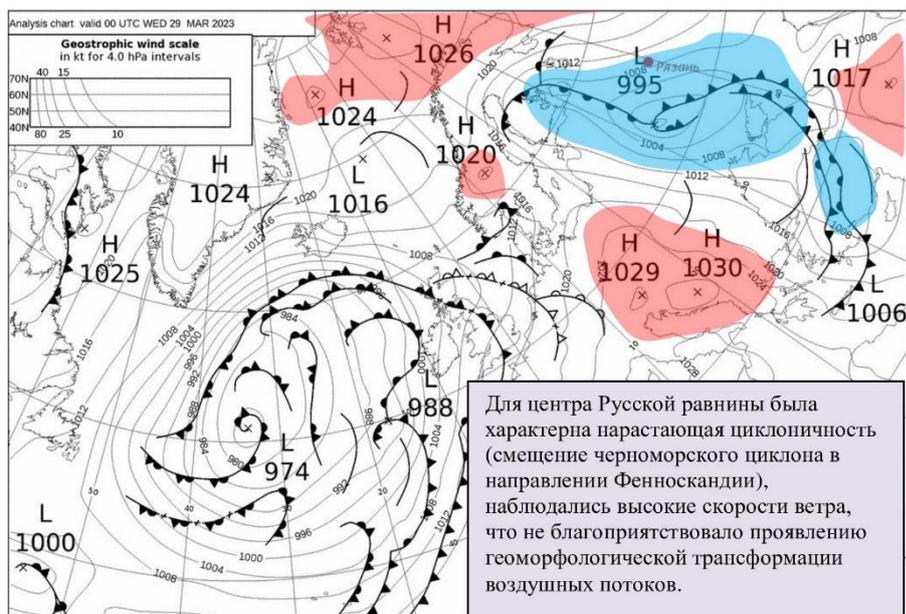


Рис. 6. Пример синоптической ситуации, не способствующей проявлению атмосферно-геоморфологических взаимосвязей: карта барических образований за 29 марта 2023 года (составлено по данным реанализа метеорологической службы Великобритании [Сборник карт ...])

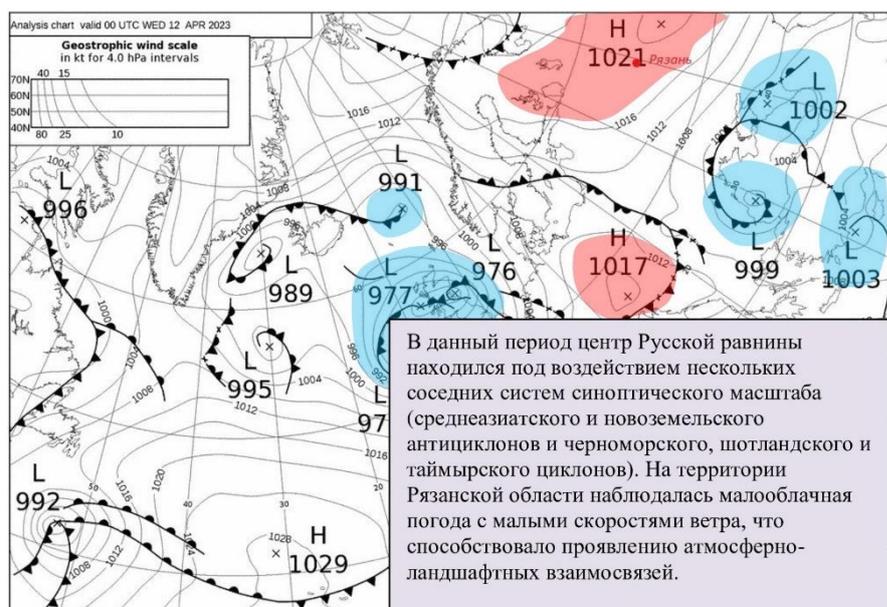


Рис. 7. Пример синоптической ситуации, характеризующейся наиболее наглядным проявлением атмосферно-геоморфологических взаимосвязей: карта барических образований за 12 апреля 2023 года (составлено по данным реанализа метеорологической службы Великобритании [Сборник карт погоды ...])

Оболочки радиозондов заполнялись гелием (46–50 атмосфер из 10-литрового баллона на каждую оболочку) и имели балластный груз (также выполнял функцию газовой арматуры) для снижения скорости подъема. Радиозонды, запускаемые на аэрологических станциях, снабжаются большей по размеру латексной оболочкой, обеспечивающей скорость подъема радиозонда от 3 до 10 м/с (в зависимости от погодных условий). При этом радиозонд проходит через пограничный слой атмосферы за 1–2 минуты и не успевает охарактеризовать его термические и динамические особенности, что делает аэрологические данные Росгидромета малоприменимыми для целей нашего исследования. Для зондирования ПСА необходимо принимать меры по замедлению подъема оболочки и датчика. Балластный груз, малоразмерность оболочки и ее «недозаполнение» гелием (рис. 5) снижали скорости подъема до 1,0–1,7 м/с.

Данные радиозондирования обработаны в геоинформационной системе QGIS: осуществлена трассировка траекторий зондов и графическое представление атрибутивной

информации — изменения абсолютной высоты, температуры и влажности воздуха по направлению полета, а также вертикальное (трехмерное) профилирование траекторий для анализа их пространственных отношений с формами рельефа.

Результаты и обсуждение

Наибольший интерес представляет вторая серия запусков (в ночь с 11 на 12 апреля), характеризующая сочетание синоптических процессов, благоприятных для геоморфологической трансформации воздушных потоков. В данный период центр Русской равнины находился в малоградиентном барическом поле с тенденцией к росту атмосферного давления под косвенным воздействием нескольких соседних систем синоптического масштаба: в приземной атмосфере наблюдалось влияние теплого и запыленного *воздушного потока из субтропиков*, проходившего по линии Ашхабад — Харьков — Калининград — Торсхавн и далее — в Арктику, а с высотой нарастало влияние иной барической системы — *таймырского центрального циклона*, составной части Арктической депрессии (рис. 8 и 9).

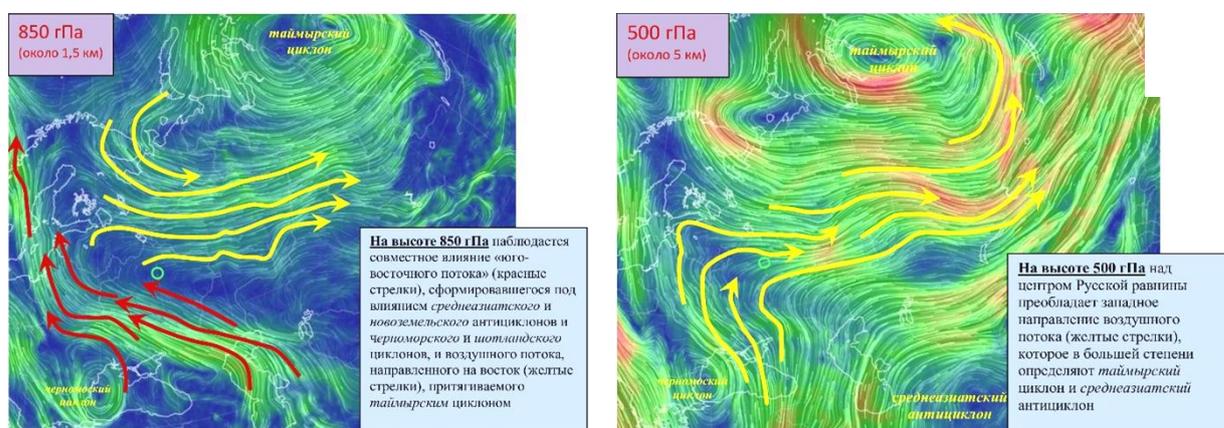


Рис. 8. Карта высотных ветров в ночь на 12 апреля 2023 года в момент проведения второй серии запусков радиозондов (составлено по онлайн-данным [Earth ...])

Теплый «юго-восточный поток» был сформирован в результате совместного действия четырех крупных барических систем (рис. 9) — они были ориентированы друг на друга своими теплыми секторами, где преобладали ветры южных румбов, и тем самым совместно усиливали «юго-восточный поток». В результате поток среднеазиатского воздуха обусловил резкий рост запыленности приземной атмосферы вплоть до Гренландии (рис. 10). Данный поток, имевший максимальное выражение на изобарической поверхности 850 гПа, то есть около 1,5 км (в окрестностях Рязани — несколько ниже), является примером дальней атмосферной миграции вещества в пределах пограничного слоя, аналогично рассмотренному выше примеру миграции черноморских радионуклидов (рис. 3).

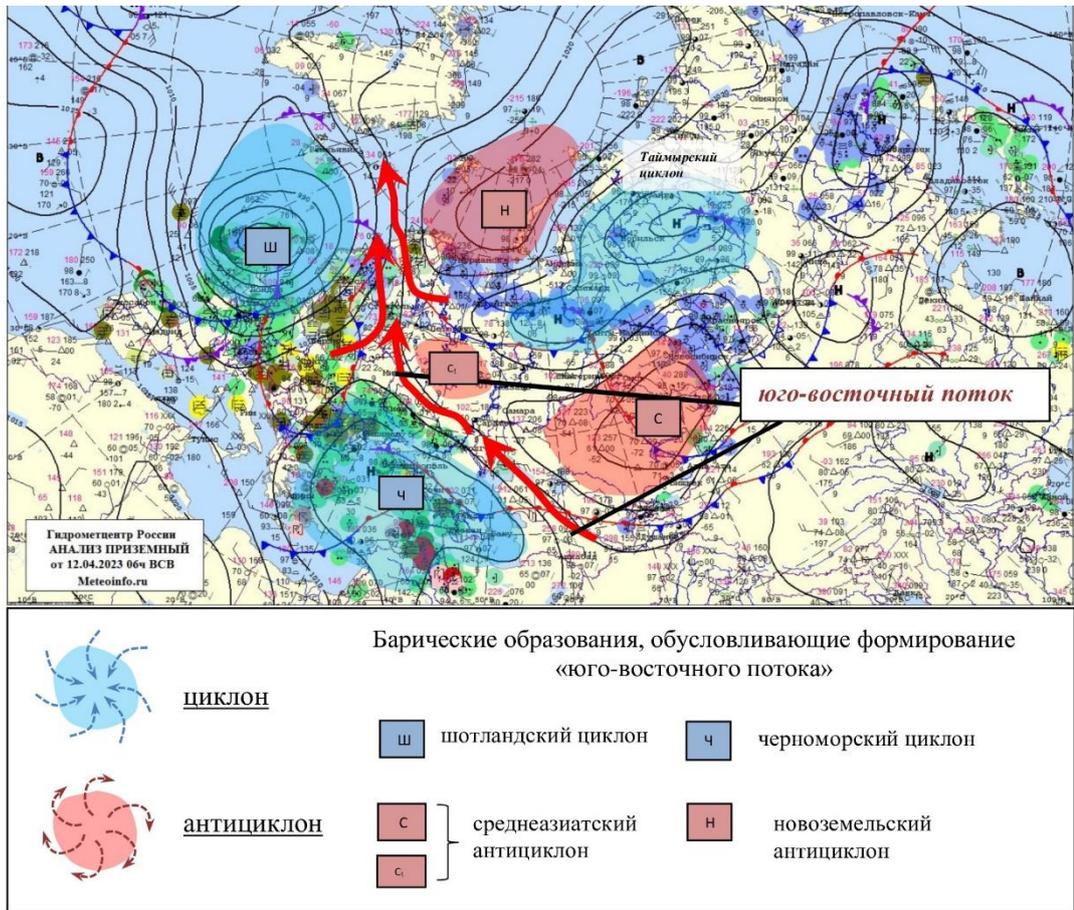


Рис. 9. Формирование «юго-восточного потока» в период с 11 по 12 апреля 2023 года по онлайн-данным Гидрометцентра России [Сборник карт погоды ...]

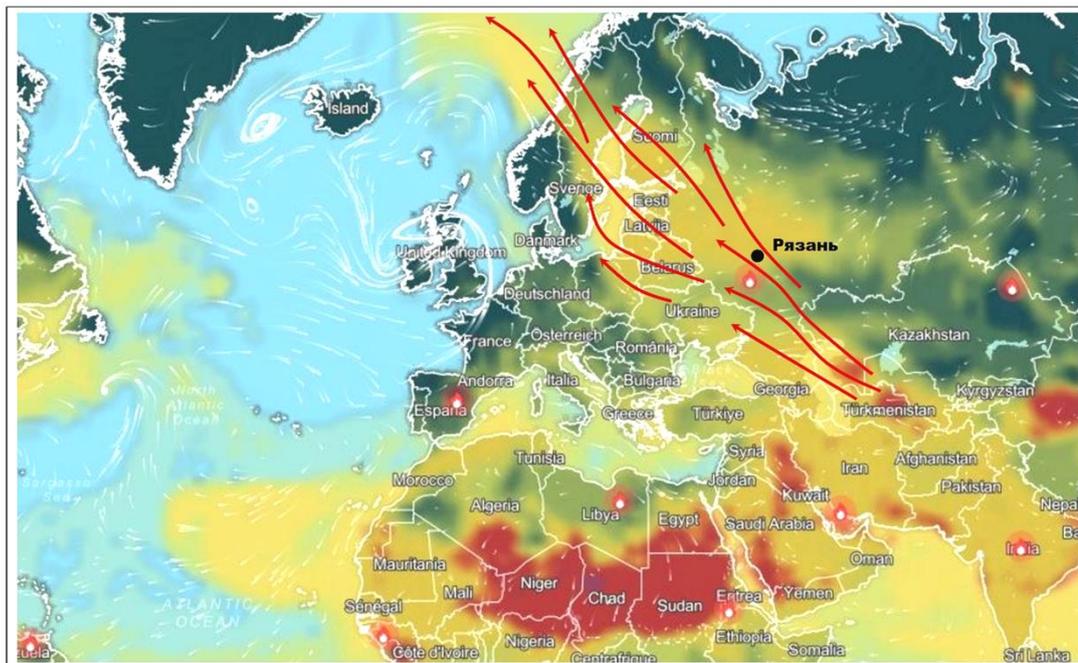


Рис. 10. Запыленность приземного воздуха над Евразией и Африкой 11 апреля 2023 года по данным спутникового мониторинга [IQAir ...]

11 апреля, в момент запуска радиозондов, в Рязанской области преобладала малооблачная погода со слабым юго-восточным ветром (румб 130°), во многих местах господствовали штилевые условия. О высокой запыленности приземного воздуха свидетельствовали ярко-красный цвет

закатного неба и наличие в воздухе серой дымки («тропическая серая мгла»). Обычно адвекция низкоширотных воздушных масс с юго-востока способствует развитию неблагоприятных метеоусловий, когда местные загрязняющие вещества суммируются с пылью из континентальной Евразии. Проведенное нами радиозондирование позволило установить причины и факторы такого ухудшения.

С высотой влияние теплого запыленного «юго-восточного потока» ослабевало и начинало преобладать циркуляционное воздействие мощного (захватывавшего даже нижнюю стратосферу) циклонического вихря над Таймыром. В результате на высоте 2–3 км над Рязанской областью формировались воздушные переносы, направленные на северо-восток, перпендикулярно или даже противоположно ветрам в пограничном слое. Такая слоистая структура нижней половины тропосферы являлась характерной особенностью второй серии запусков радиозондов и в значительной мере определяла резкое ухудшение гигиенического качества воздуха, совпавшее по времени с нашим экспериментом (рис. 11).

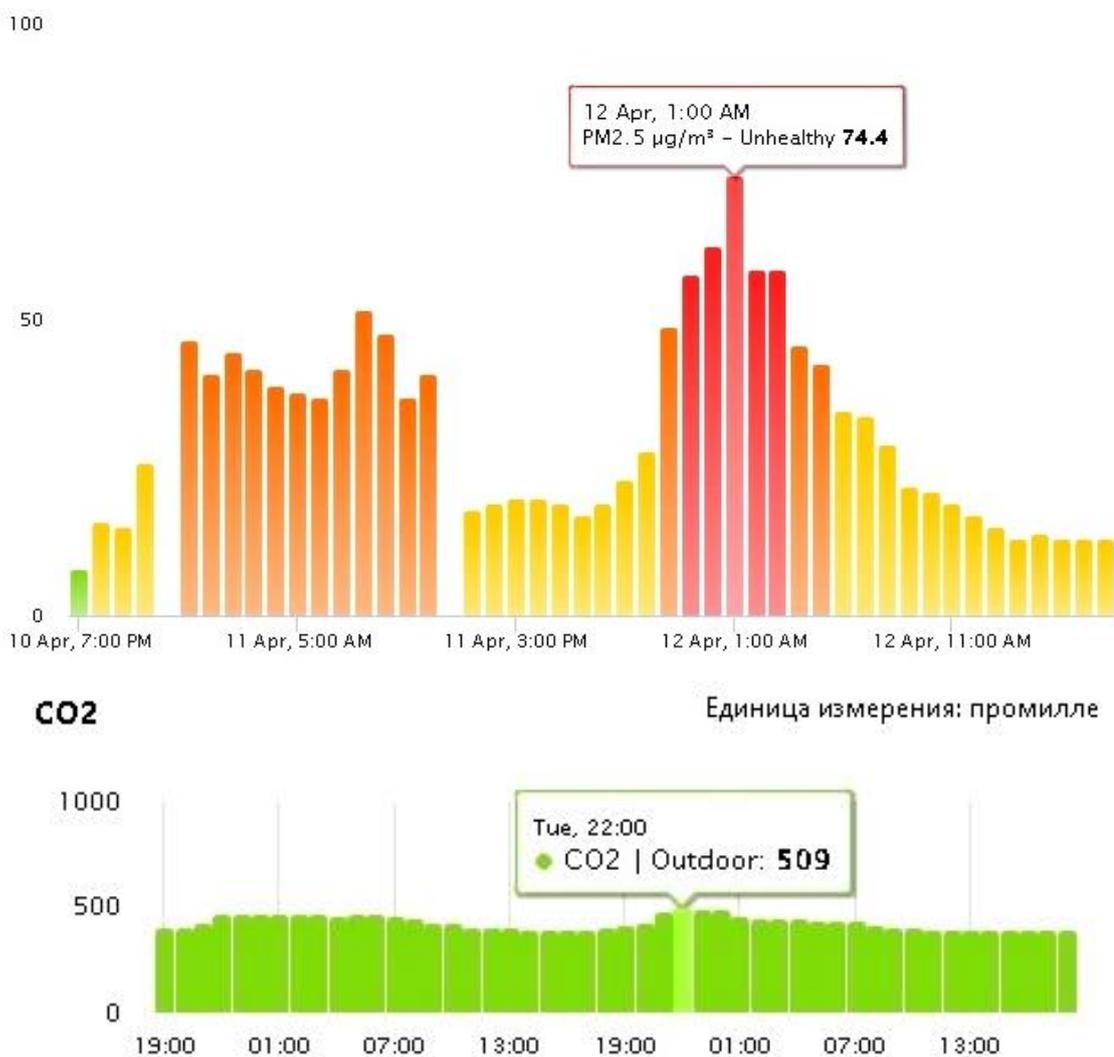


Рис. 11. Резкий рост запыленности приземного воздуха (PM_{2,5}) и концентрации углекислого газа (CO₂) в ночь на 12 апреля 2023 года по данным стационарного пункта атмосферно-экологического мониторинга лаборатории геохимии ландшафтов РГУ имени С. А. Есенина [Лаборатория геохимии ландшафтов]

Неблагоприятные условия рассеивания загрязняющих веществ и пыли природного происхождения создавались из-за резкого изменения направления и скорости ветра на разных высотах и из-за наличия в нижних трех километрах сразу двух блокирующих слоев, что на рисунке 12 показано на примере запуска № 2.2 (из точки «Шумашь» в центре Рязано-Варсковского пойменного расширения). Хорошо заметно, что в момент запуска имелась приземная инверсия выхолаживания с отрицательными вертикальными температурными градиентами, простирающаяся

до высоты 170 м (данный уровень можно признать верхней границей самой нижней части ПСА — приземного слоя атмосферы, выше которого в целом преобладают вертикальные градиенты, близкие к сухоадиабатическому). На этом фоне обособлены два горизонта:

- 1) в интервале высот 1 700–1 800 м — слой сухоустойчивой стратификации ($\gamma = 0,68\text{--}0,73$ °C/100 м),
- 2) в интервале 2 800–2 900 м — инверсия, разграничивающая генетически различные воздушные массы — «юго-восточный поток» и сферу влияния таймырского центрального циклона (γ снижается до -1 °C/100 м).

Оба блокирующих слоя оказывают существенное воздействие на миграцию вещества, источником которого является земная поверхность. В ходе радиозондирования определялась стратификация водяного пара, который может рассматриваться как информативный индикатор вертикального распределения такого вещества, в том числе антропогенных примесей (и аэрозольных, и газообразных). Как видно из рисунка 12, относительная влажность резко возростала под блокирующими слоями — не только под инверсионным, но и под сухоустойчивым, а также в пределах слоя ночной приземной инверсии. Наиболее сухими слоями нижней тропосферы были середина ПСА непосредственно над приземным слоем — 200–550 м ($f = 35\%$), и горизонт северной умеренной воздушной массы («таймырской») над инверсионным слоем на высоте свыше 2 900 м ($f = 20\text{--}24\%$). Таким образом, фазовые границы в атмосфере служат ограничителями процессов вертикального обмена, что обуславливает накопление под ними малых компонентов атмосферы «поверхностного» происхождения, включая антропогенные токсиканты.

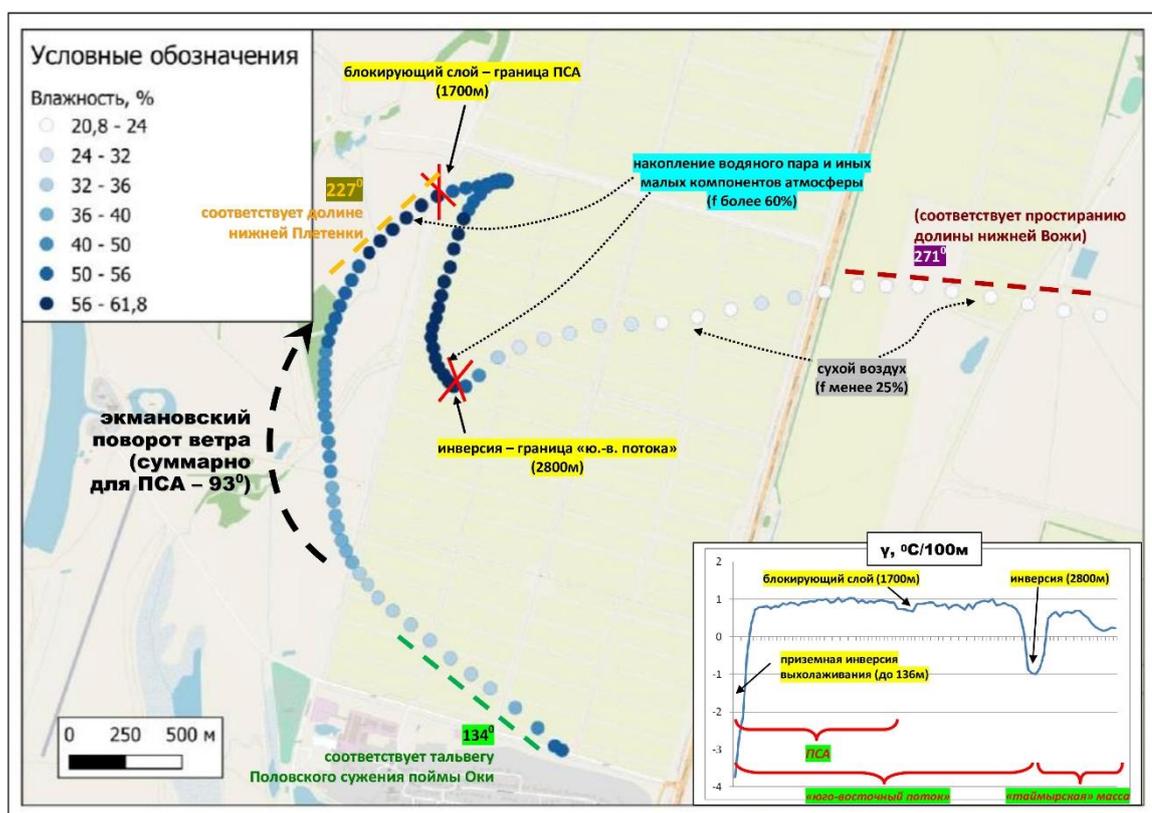


Рис. 12. Траектория полета радиозонда № 2.2, относительная влажность как индикатор условий вертикального обмена и циркуляционные особенности ПСА

К числу таких фазовых рубежей относится слой сухоустойчивой стратификации, который в Рязанском расширении поймы Оки в момент проведения зондирования располагался на высоте 1 700 м (нижняя граница). Температурные градиенты в его пределах не были инверсионными, но он оказывал не менее существенное влияние на распределение водяного пара и иных веществ, диффундирующих от земной поверхности, чем вышерасположенный слой инверсии. Именно с данным блокирующим слоем мы ассоциируем верхнюю границу ПСА в соответствии с принятой нами трактовкой данного атмосферного образования и целями исследования.

Инверсия на высоте свыше 2 700 м разграничивала генетически различные воздушные массы. Выше ее располагалась масса, связанная преимущественно с влиянием таймырского

циклона, а ниже — периферийная часть «юго-восточного потока» (рис. 13). Последняя в свою очередь отчетливо разделялась на две составляющие: нижние слои (до высоты 1 700 м), формировавшие ПСА, и верхние подынверсионные слои, находившиеся в положении неустановившегося равновесия, поскольку влияние «юго-восточного потока» и ландшафтного покрова там уже ослабевало, а вовлеченности в «таймырскую циркуляцию» еще в полной мере не произошло. В связи с этим вертикальные и горизонтальные переносы в подынверсионном слое между 1 700 м и 2 800 м абсолютной высоты были крайне изменчивы и находились под влиянием случайных факторов, существенно меняя направление и скорость от места к месту. Такая изменчивость воздушных потоков, безусловно, усиливала блокирующую функцию сухоустойчивого слоя на верхней границе ПСА и вносила вклад в резкое ухудшение гигиенического качества воздуха в Рязани и на рязанском участке поймы Оки (рис. 11).

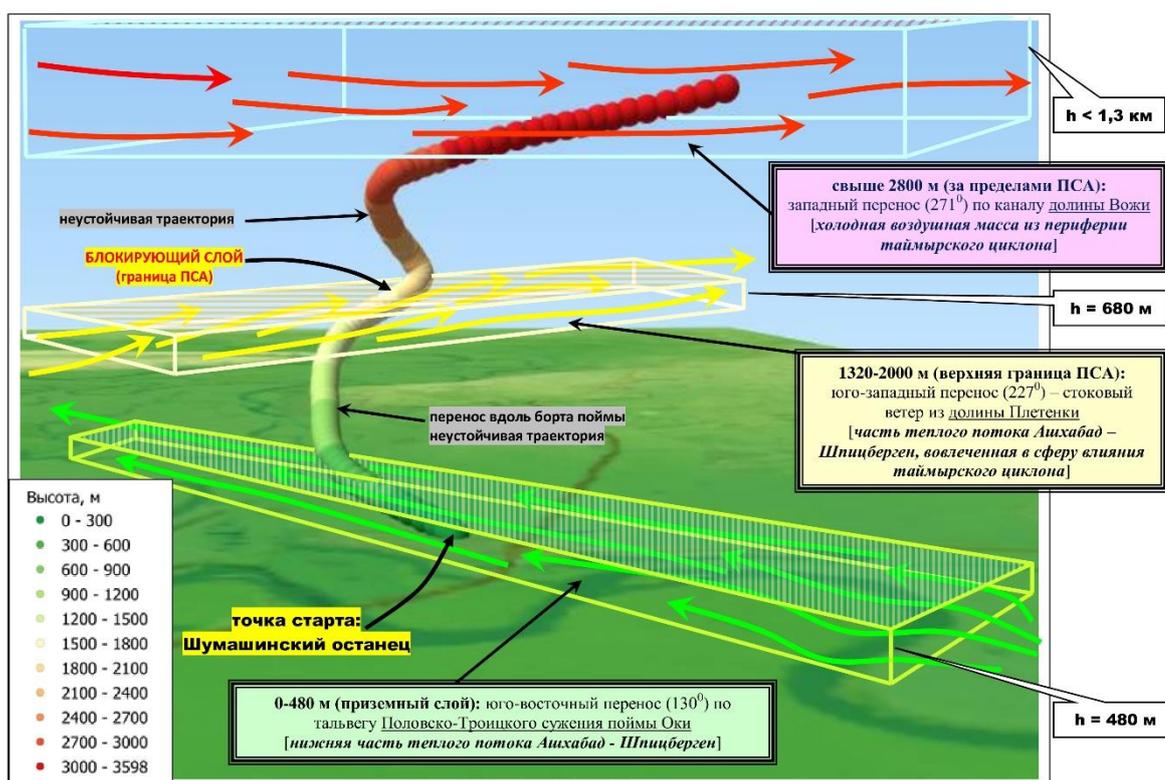


Рис. 13. Изменение направлений ветра с высотой под влиянием геоморфологических факторов (по данным радиозондирования: запуск 2.2)

Вышесказанное хорошо заметно на примере траектории полета радиозонда № 2.2. Датчик, довольно быстро преодолев приземную инверсию выхолаживания, был вовлечен в достаточно хорошо выраженный воздушный поток и двигался с горизонтальной скоростью 4,5 м/с в северо-западном направлении, постепенно поднимаясь до высоты 590 м. Ветер, осуществлявший перенос радиозонда на данном участке, имел, таким образом, юго-восточное направление (130°), которое точно соответствовало теоретически возможному направлению геострофического ветра в центре Русской равнины, которое определялось структурой приземного барического поля (рис. 7). Тем самым уже в начале полета траектория радиозонда отличалась от теоретически ожидаемой, соответствуя направлению геострофического ветра, хотя должна была отклоняться от него на $30-40^\circ$ влево.

Тем не менее на абсолютной высоте 590–600 м (480–490 м над поверхностью поймы) начался скачкообразный правый поворот вектора скорости радиозонда: достаточно быстро направление изменилось с 130° до 179° и далее на протяжении 1 км не менялось. Таким образом, уже в нижней части ПСА поворот превысил теоретически ожидаемые 40° (обычно отклонение реального приземного ветра от геострофического над сушей редко превышает данную величину). На высоте 1 100–1 400 м произошел очередной поворот траектории радиозонда вправо — еще на 48° — и румб вектора скорости составил 227° . Данное направление полета сохранялось неизменным до верхней границы ПСА.

Таким образом, над рязанским участком поймы Оки была зафиксирована экмановская спираль (рис. 12), но она имела ряд принципиальных отличий от средних параметров, на которые обычно ориентируются в процессе моделирования:

- правый поворот вектора скорости с высотой происходил не плавно, а ступенчато;
- горизонтальная составляющая скорости ветра с высотой не возрастала, а снижалась (например, после первого поворота вправо на высоте 900–1 000 м она составляла 2,13 м/с, что более чем в два раза ниже, чем в интервале высот 170–590 м);
- суммарный угол правого поворота ветра от земной поверхности до верхней границы ПСА более чем в два раза превысил ожидаемое значение;
- наибольшее соответствие ожидаемому направлению геострофического ветра наблюдалось не на верхней, а на нижней границе ПСА, в том числе в приземном слое.

Следует подчеркнуть, что указанные отличия воздушных потоков над поймой Оки в пределах ПСА от теоретически ожидаемых параметров являются закономерными и отражают тесную взаимосвязь воздушных потоков с рельефом поймы и ее окружения (рис. 13). При этом *рельеф в погодных условиях, сопровождавших вторую серию запусков, выступал не только и не столько как препятствие (тормозящее и отклоняющее линии тока за счет силы трения), сколько как канализирующий фактор, представлявший для потоков воздуха варианты «путей наименьшего сопротивления»*. Такие варианты в большинстве случаев были связаны с линейными отрицательными формами рельефа (речными долинами и особенно пойменными сужениями).

Так, в интервале относительных высот от 0 до 590 м (нижняя часть ПСА, включая приземный слой с инверсионной стратификацией) румб горизонтальной составляющей скорости радиозонда — 130° — лишь случайно совпал с вектором геострофического ветра: в реальности на данных высотах наблюдалось влияние на атмосферный перенос конфигурации Половского сужения поймы Оки, которое на высоте 600–1 100 м сменилось преимущественным влиянием иного геоморфологического фактора, что и вызвало изменение направления подъема. Таким новым фактором — более значимым на данном участке — послужило простирающееся восточного борта окской поймы вблизи точки запуска: в тот момент оно соответствовало границе затопленной и незатопленной части поймы. Подъем полых вод в контурах поймы уменьшает силу трения, в связи с чем изменение направления переноса радиозонда в данном диапазоне высот имеет вполне определенную физическую причину. Западнее места запуска в контурах поймы располагаются источники повышенного трения — Заокский, Коростовский и более мелкие внутривпойменные останцы, из-за чего воздушные потоки не устремлялись в глубь поймы, а прижимались к ее восточному борту.

На высоте 1 400 м радиозонд попал еще в один воздушный поток, в котором, уже в третий раз в пределах ПСА, произошла смена ведущего фактора ветра: на данной высоте им стала конфигурация долины реки Плетенки, порождающей стоковый линейный поток, влияние которого распространялось на все Рязано-варсковское пойменное расширение, но ограничивалось верхней периферией ПСА (рис. 13).

Таким образом, радиозондирование выявило три генетически различных воздушных потока со скоростями от 2,0 до 4,5 м/с в контурах Рязано-варсковского расширения, которые реагировали на различные элементы рельефа, причем значимость этих элементов с высотой менялась. В нижней трети ПСА господствовало влияние Половского сужения, постепенно ослабевающее за счет растекания воздуха по расширенному участку поймы, а в его верхней части преобладали стоковые ветры, направленные на окскую пойму со Среднерусской возвышенности и тяготеющие к элементам рельефа (линеаментам), способным оказать на них канализирующее влияние. Ближайшим к точке запуска зонда № 2.2 линеаментом является долина Плетенки, а на траектории № 2.1 и 2.3 в соответствующем высотном диапазоне (в верхней трети ПСА) оказывали воздействие иные аналогичные формы рельефа — долина Листвянки, сужение окской поймы между Коростовским останцом и Константиновским блоком, отчасти — долина верхней Вожи (рис. 14).

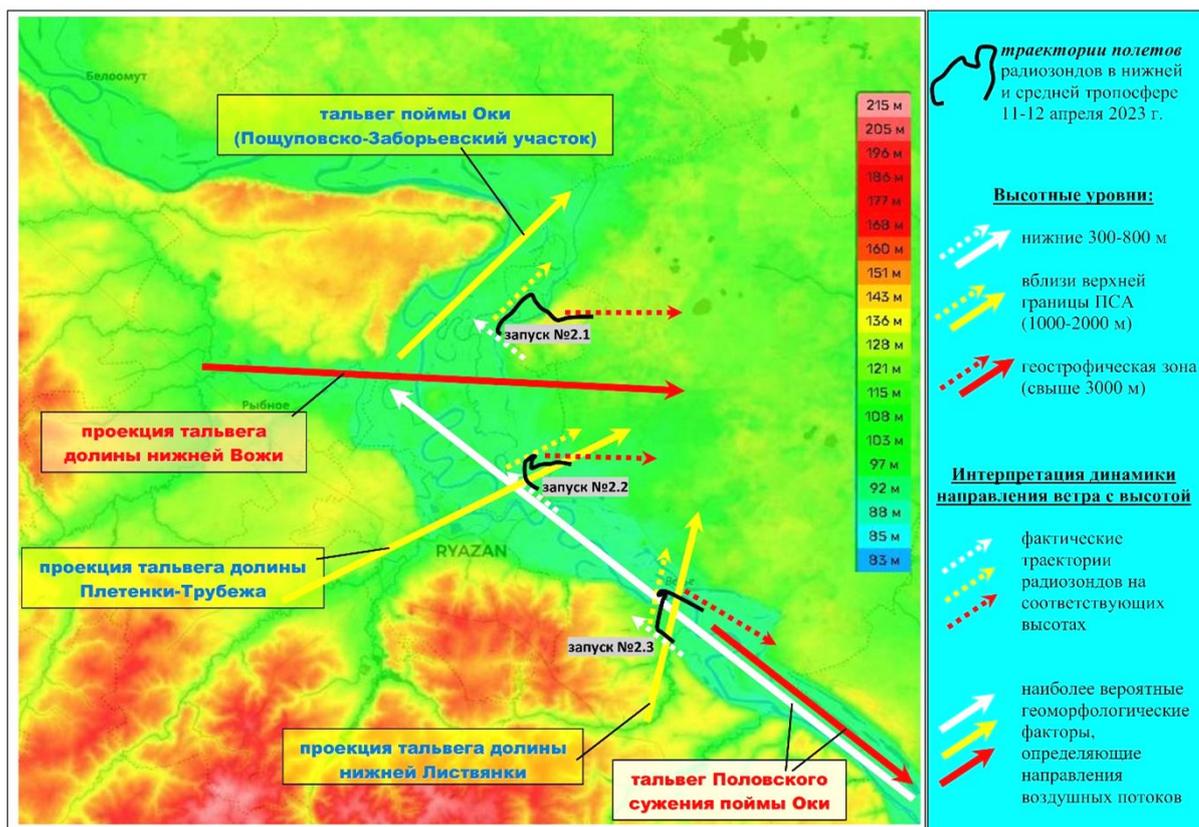


Рис. 14. Изменение влияния ведущих геоморфологических факторов, определяющих направления траекторий радиозондов апрельской серии запусков

Как указывалось выше, атмосфера вечером 11 апреля над центром Русской равнины имела слоистую структуру: наблюдалось «противоборство» юго-восточного потока и таймырского циклонического вихря, причем с высотой влияние первого постепенно ослабевало, а второго — возрастало. При этом в интервале от нескольких сотен метров до 3 км была расположена переходная зона, к которой следует отнести верхнюю и даже среднюю часть ПСА над окской поймой. Смена направления горизонтального переноса радиозонда на абсолютной высоте 590 м как раз и была вызвана тем, что датчик покинул зону преимущественного влияния субтропической воздушной массы и поднялся в пределы переходной зоны, где формировались воздушные потоки, направленные в общем плане на восток и северо-восток, к Таймыру. В этой связи вблизи Рязановарсковского пойменного расширения в наибольшей степени соответствовала северо-восточному простираению конфигурация только одного линеамента — долины Плетенки; для траекторий № 2.1 и 2.3 имели значение иные, ближайшие к ним линеаменты (рис. 14). Точного совпадения в простираении линеаментов не наблюдалось, поэтому и направления ветра на всех трех траекториях в верхней части ПСА несколько различались (колебались в пределах 203–227°), лишь в общем плане соответствуя «таймырскому вектору».

Влияние таймырского барического минимума стало абсолютно преобладать после преодоления радиозондом инверсионного слоя на высоте 2 800 м и его вхождения в пределы генетически иной воздушной массы. Это повлекло за собой разворот ветра на 90° влево непосредственно в слое инверсии (тем самым линии тока приблизились к вектору геострофического ветра на изобарической поверхности 500 гПа (рис. 14)) и примерно 2,5-кратное увеличение горизонтальной скорости ветра (до 4,95 м/с). При этом все указанные изменения произошли непосредственно в инверсионном слое, что характеризует инверсии как важнейшие источники слоистости атмосферы и развития в ней фазовых рубежей, труднопреодолимых для мигрирующего вещества.

Кроме того, направление надынверсионного воздушного потока не вполне соответствовало геострофическому и не оставалось постоянным в пространстве (рис. 14): зонды № 2.1 и 2.2 на высотах 3 500 и более метров зафиксировали западные ветры (румбы 264 и 271° соответственно), а зонд № 2.3 — северо-западные (307°). Данные различия также обусловлены геоморфологическим

фактором — канализирующим влиянием долины нижней Вожи (траектории № 2.1 и 2.2) и, в очередной раз, Половского пойменного сужения (зонд № 2.3).

Следовательно, в синоптических условиях второй серии запусков влияние рельефа на воздушные потоки сохранялось далеко за пределами ПСА. Такие парадоксально масштабные атмосферно-геоморфологические взаимосвязи и в XXI веке вряд ли возможно адекватно смоделировать, не опираясь на экспериментальные данные. При этом нельзя не отметить еще один парадокс: на траектории зонда № 2.3 Половское сужение канализировало два взаимно противоположных потока — «юго-восточный» в нижней части ПСА (130°) и надынверсионный «таймырский» (307°), разделенные промежутком 1 150 м, где господствовали иные факторы воздушной миграции (рис. 14). В этом проявляется уникальная ландшафтная функция данного участка поймы Оки; механизм его канализирующего влияния еще предстоит изучить.

Из полученной в ходе первой серии запусков аэрологической информации в данном сообщении отметим только один характерный аспект — трансформацию приземного ветра геоморфологическими неоднородностями в контурах поймы Оки. Наиболее значительные источники трения на Рязанском пойменном участке (IV) связаны с многочисленными внутривпойменными останцами разного ранга. Крупнейшим из них является Коростовский останцовый массив, вблизи которого проходила траектория радиозонда № 1.1. Останец, во-первых, внес вклад в снижение горизонтальной составляющей скорости зонда до 10 м/с (это минимальная величина на высотном уровне 500–1 300 м для всей первой серии запусков), а во-вторых, оказал отчетливое отклоняющее воздействие на форму траектории, сместив ее на 900–950 м к северу от ожидаемого направления (рис. 15).

Таким образом, даже в неблагоприятных синоптических условиях и даже на высоте 500–1 300 м останцы Рязанского пойменного участка оказывают влияние на местную циркуляцию, причем их влияние иссякает только вблизи верхней границы ПСА — на высоте, на два порядка превышающей их собственную высоту относительно поверхности поймы (с учетом осложняющих их поверхность лесных массивов) (рис. 16).

В более благоприятных для атмосферно-геоморфологических взаимосвязей условиях данное влияние может быть выражено существенно лучше, о чем свидетельствуют результаты предпринятой нами реконструкции путей и скорости воздушной миграции загрязняющих веществ в ходе одного из эпизодов ухудшения качества воздуха в пригородах Рязани 22 февраля 2020 года. Не имея в то время технической возможности применить метод радиозондирования, мы осуществили указанную реконструкцию по данным интернет-ресурсов (рис. 17). Анализ сообщений пользователей соцсети «ВКонтакте», отмечавших появление резких «химических запахов» [Новости Рязани], показал, что поток токсичных антропогенных продуктов обошел Заокский и Коростовский останцы (захватив, впрочем, Шумашинский) и в дальнейшем мигрировал в северном направлении, «прижимаясь» к борту поймы и не отклоняясь к ее центру — подобно траектории радиозонда № 2.2 на высоте 600–1 400 м (рис. 12 и 13). Тем самым тяготение воздушных потоков к восточному борту поймы Оки на ее Рязанском участке (IV) из-за шероховатостей, порождаемых крупными останцами надпойменных террас, наблюдается, очевидно, достаточно регулярно.



Рис. 15. Отклоняющее влияние внутрипойменного остана на воздушные потоки в пределах ПСА (на примере траектории радиозонда № 1.1)



Рис. 16. Фрагмент сферической аэропанорамы Рязанского пойменного ландшафта: вид на Коростовский внутрипойменный оstanец с высоты 1 300 м (из точки окончания отклоняющего влияния остана на ветровые потоки в ПСА — в синоптических условиях 28 марта 2023 года)

Примечание: использован скриншот онлайн-геоинформационной системы «Google. Планета Земля» [Google Earth]. Отмечены иные крупнейшие внутрипойменные останцы Рязано-варсковского расширения.

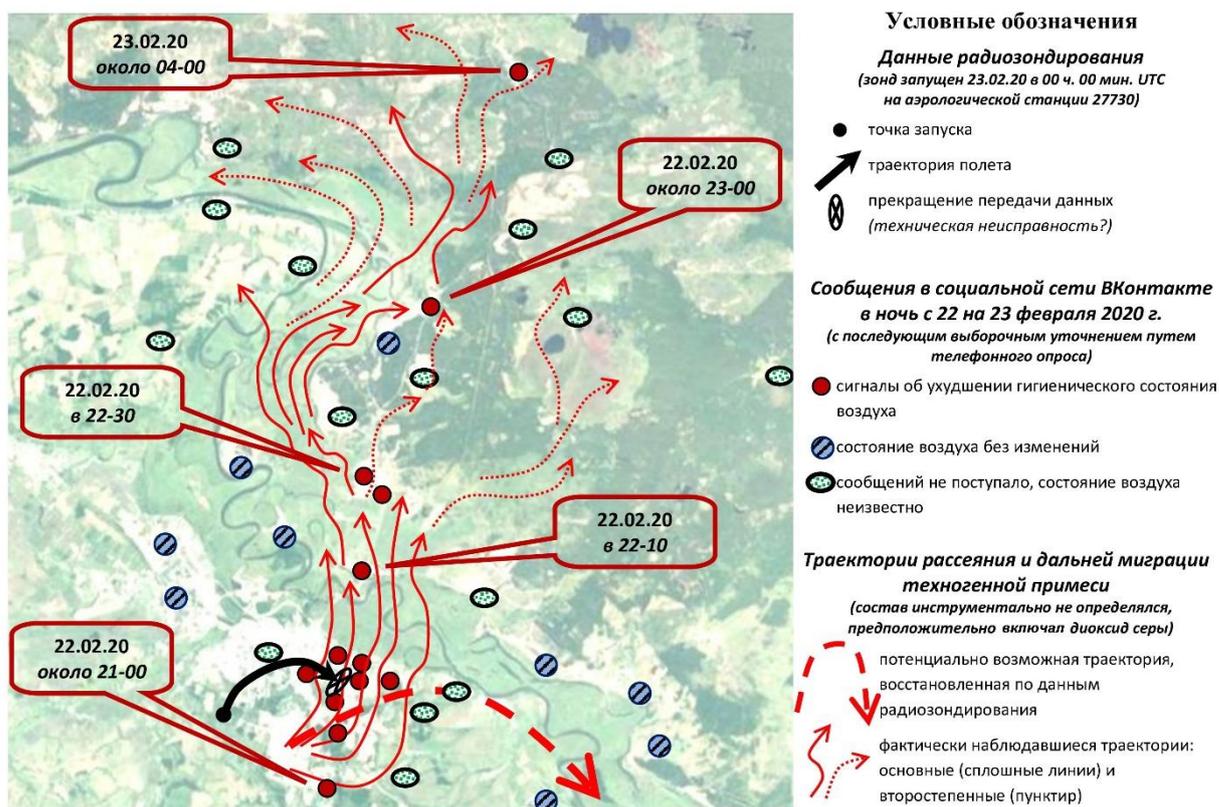


Рис. 17. Опыт использования информации из социальных сетей [Новости Рязани] для восполнения дефицита метеорологических и аэрологических данных (на примере 22–23 февраля 2020 года) [Тобратов, Железнова, Поклонов, Кадыров, 2022]

Рассмотренный пример показателен еще и потому, что он отражает ограниченность точечных аэрологических данных, получаемых на достаточно редкой сети станций Росгидромета и малопригодных для характеристики взаимодействия атмосферы с ландшафтным покровом, когда даже нерегулярные данные из соцсетей становятся более информативными и достоверными (рис. 17). Безусловно, использование соцсетей для получения научной информации — не выход: данные экспедиционного радиозондирования значительно более предпочтительны. Мы планируем продолжать аэрологические исследования динамики ПСА и изучение особенностей атмосферно-геоморфологических взаимосвязей в различных синоптических условиях.

Заключение

Таким образом, примененный нами метод радиозондирования позволил выявить многообразные аспекты влияния равнинных морфоструктур на приземные воздушные течения (в данном сообщении обсуждена лишь часть полученных данных). Как и ожидалось изначально, указанное влияние оказалось значительно более сложным, чем простое торможение и незначительное отклонение от геострофического потока, и при благоприятных погодных условиях (в малоградиентном барическом поле) распространялось далеко за пределы пограничного слоя. Установлена роль линеаментов и внутривпадинных структур как факторов, канализирующих воздушные потоки и формирующих устойчивые местные траектории воздушных масс. Установлено также, что особенности проявления атмосферно-геоморфологических взаимосвязей определяются циркуляционным фактором и меняются вслед за изменением сочетаний центров действия атмосферы синоптического масштаба. Исследования по данному вопросу продолжаются.

Список источников

1. Айдовосов А. А., Айдовосов Г. А., Заурбеков Н. С. Модельная оценка экологической обстановки компонентов природной среды с учетом атмосферных процессов. — М. : Акад. естествознания, 2018. — 341 с.

2. Бызова Н. Л., Гаргер Е. К., Иванов В. Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. — Л. : Гидрометеоздат, 1991. — 278 с.
3. Замай С. С., Якубайлик О. Э. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города. — Красноярск : Изд-во Красноярского гос. ун-та, 1998. — 109 с.
4. Израэль Ю. А., Де Корт М., Джонес А. Р., Квасникова Е. В. [и др.]. Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии. — Люксембург : Люксембургское бюро для офиц. изд. Европейских сообществ, 1998. — 71 с.
5. Кривцов В. А., Тобратов С. А., Водорезов А. В., Комаров М. М., Железнова О. С., Соловьева Е. А. Природный потенциал ландшафтов Рязанской области. — Рязань : Ряз. гос. ун-т им. С. А. Есенина, 2011. — 760 с.
6. Лаборатория геохимии ландшафтов // ВКонтакте. — URL : <https://vk.com/public219925668> (дата обращения: 31.05.2023).
7. Леженин А. А., Ярославцева Т. В., Рапута В. Ф. Мониторинг аэрозольного загрязнения снежного покрова на основе наземной и спутниковой информации // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. — 2016. — № 9 (7). — С. 950–959.
8. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе : утв. Приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273. — М. : Ростехнадзор, 2017. — 110 с.
9. Новости Рязани // ВКонтакте. — 2020, 22 февр. — URL : https://vk.com/wall-38416744_1610588?api_access_key=bcad5c8532b73155c3 (дата обращения: 10.03.2022).
10. Сборник карт погоды (фактические и прогностические карты погоды) // Meteoweb.ru : интернет-журнал о метеорологии и астрономии. — URL : <http://meteoweb.ru/> (дата обращения: 01.06.2023).
11. Ступин А. Б., Оверко В. С. Влияние неоднородности рельефа на рассеивание выбросов в атмосфере // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». — Донецьк : ДВНЗ ДонНТУ, 2006. — Вип. 107. — С. 76–80.
12. Тобратов С. А., Железнова О. С., Поклонов А. П., Кадыров А. С. Ландшафтные факторы атмосферной миграции техногенных аэрозолей в центре Русской равнины // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли : материалы IV Байкальской междунар. науч. конф. — Иркутск : Изд-во ООО «Репроцентр А1», 2022. — С. 127–134.
13. Чернобыль. 26.04.1986. Карта радиоактивного загрязнения Европы. — URL : <https://karty.by/1945-2005/chernobyl-26-04-1986-karta-radioaktivnogo-zagryazneniya-evropy/> (дата обращения: 01.07.2023).
14. Google Earth. — URL : <https://www.google.com/earth/about/versions/#earth-for-web> (дата обращения: 05.07.2023).
15. Earth: a global map of wind, weather and ocean conditions. — URL : <https://earth.nullschool.net/> (дата обращения: 25.05.2023).
16. IQAir: Live Animated Air Quality Map. — URL : <https://www.iqair.com/air-quality-map> (дата обращения: 12.04.2023).
17. Techniques and decision making in the assessment of off-site consequences of an accident in a nuclear facility. — Vienne : International Atomic Energy Agency, 1987. — Safety series, no. 86. — Pp. 39–55.

References

1. Aydosov A. A., Aydosov G. A., Zaurbekov N. S. *Modelnaya otsenka ekologicheskoy obstanovki komponentov prirodnoy sredy s uchetom atmosferynykh protsessov* [Model assessment of the ecological situation of the components of the natural environment taking into account atmospheric processes]. Moscow, Academy of Natural Sciences Publ., 2018, 341 p. (In Russian).
2. Byzova N. L., Garger E. K., Ivanov V. N. *Ekspierimentalnyye issledovaniya atmosferynoy diffuzii i raschety rasseyaniya primesi* [Experimental studies of atmospheric diffusion and calculations of impurity scattering]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 278 p. (In Russian).
3. Zamay S. S., Yakubaylik O. E. *Modeli otsenki i prognoza zagryazneniya atmosfery promyshlennymi vybrosami v informatsionno-analiticheskoy sisteme prirodookhrannykh sluzhb krupnogo goroda* [Models for assessing and forecasting atmospheric pollution by industrial emissions in the information-analytical system of environmental services of a large city]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University Publ., 1998, 109 p. (In Russian).
4. Israel Yu. A., De Kort M., Jones A. R., Kvasnikova E. V. [et al.]. *Atlas zagryazneniya Yevropy tseyziyem posle Chernobylskoy avarii* [Atlas of cesium pollution in Europe after the Chernobyl accident]. Luxembourg, Luxembourg Office for official publications of European Communities, 1998, 71 p. (In Russian).
5. Krivtsov V. A., Tokratov S. A., Vodorezov A. V., Komarov M. M., Zheleznova O. S., Solovyova E. A. *Prirodnyy potentsial landshaftov Ryazanskoy oblasti* [Natural potential of landscapes of the Ryazan Region]. Ryazan, Ryazan State University named for S. A. Yesenin Publ., 2011, 760 p. (In Russian).
6. Laboratory of landscape geochemistry. *Vkontakte*. Available at: <https://vk.com/public219925668> (accessed: 31.05.2023). (In Russian).
7. Lezhenin A. A., Yaroslavtseva T. V., Raputa V. F. Monitoring of aerosol pollution of snow cover with ground based observation data and satellite information. *Zhurnal Sibirskogo Federalnogo Universiteta* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies]. 2016, iss. 9 (7), pp. 950–959. (In Russian).

8. *Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozdukh: utv. Prikazom Minprirody Rossii ot 06.06.2017 № 273* [Methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in atmospheric air: approved by Order of the Ministry of Natural Resources of Russia of 06.06.2017, no. 273]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2017, 110 p. (In Russian).
9. Ryazan News. *VKontakte*. 2020, 22 Feb. Available at: https://vk.com/wall-38416744_1610588?api_access_key=bcad5c8532b73155c3 (accessed 10.03.2022). (In Russian).
10. Collection of weather maps (actual and prognostic weather maps). *Meteoweb.ru: internet-zhurnal o meteorologii i astronomii* [Meteoweb.ru: online journal about meteorology and astronomy]. Available at: <http://meteoweb.ru/> (accessed: 01.06.2023). (In Russian).
11. Stupin A. B., Overko V. S. Influence of relief heterogeneity on dispersion of emissions in the atmosphere. *Naukovі pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu. Ser. "Informatika, kibernetika ta obchislyvalna tekhnika"* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series "Computer science, cybernetics and computational technology"]. Donetsk, DVNZ DonNTU Publ., 2006, iss. 107, pp. 76–80. (In Russian).
12. Tobratov S. A., Zheleznova O. S., Poklonov A. P., Kadyrov A. S. Landscape factors of atmospheric migration of technogenic aerosols in the center of the Russian Plain. *Snezhnyy pokrov, atmosferynye osadki, aerizoli: materialy IV Байкал'skoy mezhdunar. nauch. konf.* [Snow cover, atmospheric precipitation, aerosols: materials of the IV Baikal International Scientific conference]. Irkutsk, LLC Reprocenter A1 Publ., 2022, pp. 127–134. (In Russian).
13. *Chernobyl. 26.04.1986. Karta radioaktivnogo zagryazneniya Yevropy* [Chernobyl. 26.04.1986. Map of radioactive contamination of Europe]. Available at: <https://karty.by/1945-2005/chernobyl-26-04-1986-karta-radioaktivnogo-zagryazneniya-evropy/> (accessed: 07/01/2023). (In Russian).
14. *Google Earth*. Available at: <https://www.google.com/earth/about/versions/#earth-for-web> (accessed: 05.07.2023).
15. *Earth: a global map of wind, weather and ocean conditions*. Available at: <https://earth.nullschool.net/> (accessed: 25.05.2023).
16. *IQAir: Live Animated Air Quality Map*. Available at: <https://www.iqair.com/air-quality-map> (accessed: 12.04.2023).
17. *Techniques and decision making in the assessment of off-site consequences of an accident in a nuclear facility*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1987, Safety series, iss. 86, pp. 39–55.

Информация об авторах

Тобратов Сергей Анатольевич — кандидат биологических наук, доцент, руководитель научно-исследовательской лаборатории геохимии ландшафтов института естественных наук Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

Сфера научных интересов: геохимия ландшафтов, метеорология и климатология, экологическая геохимия, региональное ландшафтоведение, природная цикличность, системогенез в природе и обществе.

Железнова Ольга Сергеевна — кандидат биологических наук, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории геохимии ландшафтов института естественных наук Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

Сфера научных интересов: биогеохимия, геохимия ландшафтов, устойчивость природных систем.

Костикова Ольга Сергеевна — преподаватель кафедры географии, экологии и природопользования института естественных наук Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

Сфера научных интересов: геоинформационные системы, экологическая геохимия.

Шилкина Юлия Николаевна — студентка 4-го курса бакалавриата института естественных наук Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

Сфера научных интересов: экологическая метеорология, палеогеография, цифровые технологии обработки информации.

Information about the authors

Tobratov Sergey Anatolyevich — candidate of biology, associate professor, head of Research Laboratory of Landscape Geochemistry at the Institute of Natural Sciences, Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

Research interests: landscape geochemistry, meteorology and climatology, ecological geochemistry, regional landscape science, natural cyclicity, system genesis in nature and society.

Zheleznova Olga Sergeevna — candidate of biology, junior researcher, Research Laboratory of Landscape Geochemistry, Institute of Natural Sciences, Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

Research interests: biogeochemistry, landscape geochemistry, sustainability of natural systems.

Kostikova Olga Sergeevna — lecturer, chair of Geography, Ecology and Nature Management, Institute of Natural Sciences, Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

Research interests: geoinformation systems, environmental geochemistry.

Shilkina Yulia Nikolayevna — 4th-year student at the Institute of Natural Sciences of Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

Research interests: ecological meteorology, paleogeography, digital information processing technologies.

Статья поступила в редакцию 05.05.2023; принята к публикации 12.06.2023.

The article was submitted 05.05.2023; accepted for publication 12.06.2023.