

Научная статья

УДК 551.4(470.313)

DOI 10.37724/RSU.2024.83.2.017

## Морфоструктурный фактор атмосферных и гидрологических процессов в ландшафтах юго-западной Мещеры (на примере Полянской наклонной равнины)

Сергей Анатольевич Тобратов<sup>1</sup>, Ольга Сергеевна Железнова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина,

Рязань, Россия

<sup>1</sup> tobratovsa@mail.ru

<sup>2</sup> o.zheleznova@365.rsu.edu.ru

**Аннотация.** Обсуждаются результаты исследования пространственных внутриландшафтных различий гидродинамики, гидрохимии, аэроионной композиции приземного воздуха и распределения чернобыльского радиоцезия в почвенном покрове юго-запада Мещерской низменности. При этом удельная активность <sup>137</sup>Cs рассматривалась как индикатор конфигурации воздушных течений в приземной атмосфере и местных условий распространения техногенных токсикантов в целом. Охарактеризованы причины и геофизические предпосылки обособления ландшафтных местностей под влиянием положительных и отрицательных морфоструктур, имеющих в своей основе элементы погребенного рельефа. Установлено, что, несмотря на химическую инертность четвертичных песчаных толщ Мещеры, минерализация поверхностных вод не везде одинаково низкая: в озерах, сформированных в привершинных частях положительных погребенных литоморфоструктур, за счет усиления водообмена она в среднем почти в два раза ниже, чем в локальных депрессиях коренного рельефа (19–22 мг/л против 27–48 мг/л). Отмечено наличие математических закономерностей взаимного расположения озерных котловин в зависимости от морфоструктурных особенностей: на выпуклых склонах погребенных останцов реализуются взаимосвязи, основанные на коэффициенте золотой пропорции в первой степени, а во впадинах коренного рельефа — на квадрате золотой пропорции. Относительно повышенные концентрации аэроионов в приземных воздушных массах и оптимальное соотношение ионов положительной и отрицательной полярностей зафиксировано на склонах локальных возвышенностей, где режим грунтовых вод оптимален для обеспечения круглогодичной вегетации хвойных — основных ионизаторов воздуха. Удельная активность <sup>137</sup>Cs в почвах отражает пространственную картину его аэральную миграцию в Южной Мещере 30 апреля 1986 года, которая определяется морфологией ландшафтного покрова (рельефа и древесной растительности): каналами основного переноса и аккумуляции радиоцезия служили дочетвертичные палеоврезы, заболоченные редколесья, крупные делянки и вырубки.

**Ключевые слова:** атмосферная миграция токсикантов, аэроионы, локальные аномалии гравитационного поля, морфология ландшафтов, морфоструктуры, погребенный рельеф, рельеф Мещерской низменности, цезий-137, чернобыльский радиоактивный след.

**Для цитирования:** Тобратов С. А., Железнова О. С. Морфоструктурный фактор атмосферных и гидрологических процессов в ландшафтах юго-западной Мещеры (на примере Полянской наклонной равнины) // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2024. № 2 (83). С. 149–169. DOI: 10.37724/RSU.2024.83.2.017.

Original article

## Morphostructural factor of atmospheric and hydrological processes in landscapes of southwestern Meschera (on the example of the sloping plain near Polyany)

Sergey A. Tobratov<sup>1</sup>, Olga S. Zheleznova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Ryazan State University named for S. A. Yesenin, Ryazan, Russia

<sup>1</sup> tobratovsa@mail.ru

<sup>2</sup> o.zheleznova@365.rsu.edu.ru

**Abstract.** The paper presents a study of spatial intra landscape differences in hydrodynamics, hydrochemistry, aeroionic composition of surface air and the distribution of Chernobyl radiocesium in the topsoil of the southwest of the Meshchera Lowland. The specific activity of <sup>137</sup>Cs was considered as an indicator of the configuration of air currents in the surface atmosphere and local conditions for the distribution of technogenic toxicants in general. The paper discusses the causes and geophysical prerequisites for isolation of landscape areas under the influence of positive and negative morphostructures based on elements of buried relief. It is established that, despite the chemical inertness of the Quaternary sand strata of Meshchera, the mineralization of surface waters is not equally low everywhere: in lakes that were formed in the near-summit parts of positive buried lithomorphostructures, due to increased water exchange, it is on average almost two times lower than in local depressions of the bedrock relief (19–22 mg/l versus 27–48 mg/l). The presence of mathematical patterns in the relative position of lake basins depending on morphostructural features is noted: on the convex slopes of buried remnants, relationships are realized based on the coefficient of the golden proportion in the first degree, and in the depressions of the bedrock relief — on the square of the golden proportion. We observed relatively increased concentrations of air ions in surface air masses and the optimal ratio of ions of positive and negative polarity on the slopes of local elevations, where the groundwater regime is optimal to ensure year-round vegetation of conifers — the main air ionizers. The specific activity of <sup>137</sup>Cs in soils reflects the spatial pattern of its aerial migration in Southern Meshchera on April 30, 1986, which is determined by the morphology of the landscape cover (relief and woody vegetation): pre-Quaternary paleocuts, swampy woodlands, large plots and clearings served as channels for the main transfer and accumulation of radiocesium.

**Keywords:** atmospheric migration of toxicants, air ions, local anomalies of the gravitational field, landscape morphology, morphostructures, buried relief, relief of the Meshchera lowland, cesium-137, Chernobyl radioactive trace.

**For citation:** Tobratov S. A., Zheleznova O. S. Morphostructural factor of atmospheric and hydrological processes in landscapes of southwestern Meschera (on the example of the sloping plain near Polyany). *The Bulletin of the Ryazan State University named for S. A. Yesenin*. 2024; 2 (83):149–169. (In Russ.). DOI: 10.37724/RSU.2024.83.2.017.

### Введение

Мещерская низменность с середины XX века является традиционным объектом ландшафтно-морфологического анализа, картографирования и районирования. Именно ландшафтам рязанской части Мещеры посвящена классическая монография сотрудников Лаборатории ландшафтоведения МГУ (см.: [Анненская, Мамай, Цесельчук, 1983]), в которой на основе идей основоположника отечественного регионального ландшафтоведения Н. А. Солнцева показана ведущая роль литогенной основы в обособлении ландшафтов и их субъединиц, а также в пространственных особенностях природопользования. Вполне закономерно, что малоконтрастный рельеф Мещеры и господство песчаных субстратов в совокупности с преобладающими тенденциями к неотектоническому опусканию либо отставанию в поднятии (что существенно затрудняет гидродинамику) обеспечивают наиболее отчетливое проявление литогенетического фактора (в том числе локальных морфоструктур) и в ландшафтной структуре, и в процессах. При этом такому системообразующему литогенетическому воздействию (наиболее «сильному» из воз-

можных, в терминологии Н. А. Солнцева [Солнцев, 2001]) подвержены и потоки грунтовых и поверхностных вод, и почвенно-геохимические процессы, и биопродуктивность зональных лесных экосистем, и даже динамика и вещественный состав приземных воздушных масс.

Развивая идеи «солнцевской» региональной школы ландшафтоведения, ранее мы показали, что на поверхностные (ландшафтные) процессы в Мещере способны влиять не только дочетвертичные кайнозойские, но и доюрские локальные структуры погребенного рельефа с большими характерными временами существования (см.: [Железнова, Тобратов, 2017]). В ходе научно-исследовательской работы (НИР) по теме «Проведение комплексного экологического обследования территории Государственного природного заказника областного значения “Солотчинский парк” и прилегающей территории для решения вопроса об изменении границ режима особой охраны и границ особо охраняемых природных территорий» (2022) мы в очередной раз отметили, что без учета геоморфологического (в том числе морфоструктурного) фактора невозможно дать адекватную интерпретацию данным полевым исследований мещерских ландшафтов. Часть результатов, полученных при выполнении НИР, обсуждается ниже.

## Основная часть

### *Материалы и методы*

Для морфоструктурного анализа и картирования ландшафтных субъединиц привлекались данные бурения недр (держатель — Рязанский филиал ФГУП «Территориальный фонд геологической информации по Центральному федеральному округу») и топографические карты масштаба 1:25000. Базовые гидрохимические характеристики — минерализация и pH поверхностных вод — определялись соответственно кондуктометрическим и потенциометрическим методами. Модуль минимального летнего меженного стока определен линейной интерполяцией по региональной картосхеме, разработанной нами по результатам гидродинамических измерений на 146 водотоках ландшафтного уровня в пределах Рязанской области (исследования выполнены в 2010 году с использованием гидрометрической вертушки ГР-21). Гранулометрический состав почв определен методом пипетки в модификации Н. А. Качинского [Качинский, 1965].

Пространственная изменчивость концентраций легких аэроионов изучалась при помощи счетчика аэроионов «Сапфир-3К» с аккумулятором DEXP Power-EG 12V 7.2Ah. Фоновые условия ионизации контролировались особенностями погоды в период измерений, в целом неблагоприятными для генерации и накопления аэроионов (облачно с прояснениями — от 4 до 10 баллов слоистых и высокослоистых облаков, в ночь перед измерениями шел дождь, наблюдался юго-западный ветер со скоростью 6–10 м/с, в порывах — до 15 м/с); при этом пространственные различия концентраций ионов разной полярности определялись в конечном счете геолого-геоморфологическим фактором (фактором ландшафтной структуры).

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почвах устанавливалась гамма-спектрометрическим методом на сцинтилляционном детекторе спектрометрического комплекса «Мультирад-гамма» с программным обеспечением «Прогресс». Все измерения выполнены на приборной базе лаборатории геохимии ландшафтов РГУ имени С. А. Есенина.

### *Ландшафтно-геоморфологическая характеристика района исследований*

Тематика реализуемой нами НИР предполагала комплексное обследование 20-го квартала Полковского лесничества (планировалось его включение в состав «Солотчинского парка») и прилегающей территории. В связи с этим районом наиболее детальных исследований была Полянская равнина (ландшафтная местность, в пределах которой расположены земли указанного лесного квартала), в первую очередь ее северная часть. Однако фактически пробоотбором и картографическим моделированием была охвачена более значительная часть Южной Мещеры (рис. 1), поскольку процессы в отдельно взятой ландшафтной субъединице объективно не могут быть поняты без учета аналогичных процессов на смежных территориях.





Рис. 2. Геолого-геоморфологический профиль через юго-западную Мещеру (линия профиля частично проходит через территорию, показанную на рис. 1)

Благодаря достаточно высокой плотности коренных пород ( $2,15 \text{ т/м}^3$ , что почти на 20 % превосходит аналогичный показатель для юрских глин [Плотность веществ ...]) (рис. 3)) указанная возвышенность формирует локальную положительную гравитационную аномалию, управляющую движением грунтовых и поверхностных вод. При этом территория Полянской равнины вовлечена в гидрологические процессы, порождаемые гравитационной аномалией Пяткинской возвышенности: в условиях склонового положения преобладает сток грунтовых вод на юго-юго-запад, местами формируются масштабные транзитные линии тока; представление о преобладающих направлениях движения вод дает гипсометрическая карта (рис. 4а).

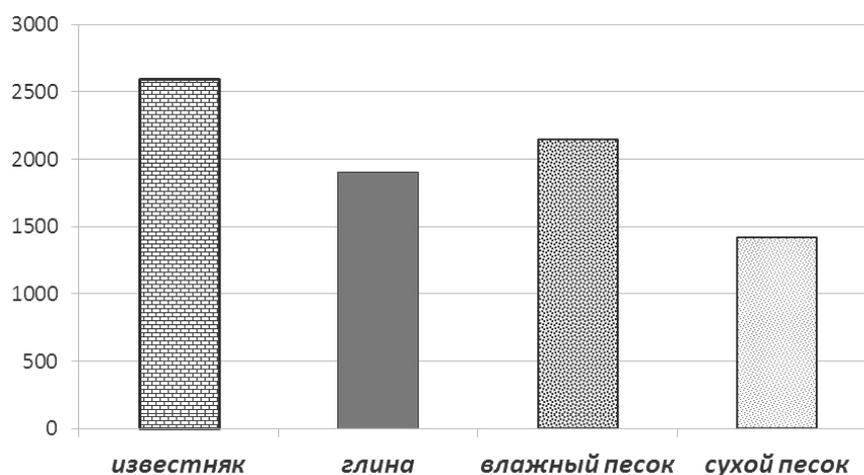
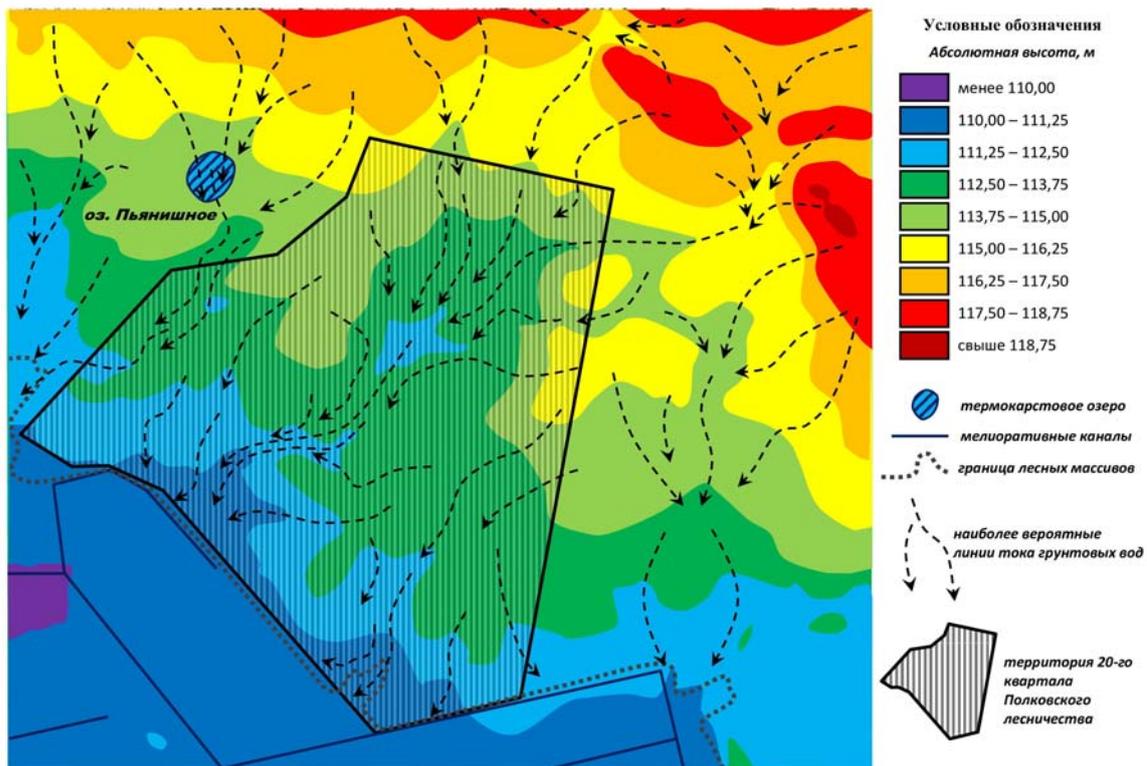
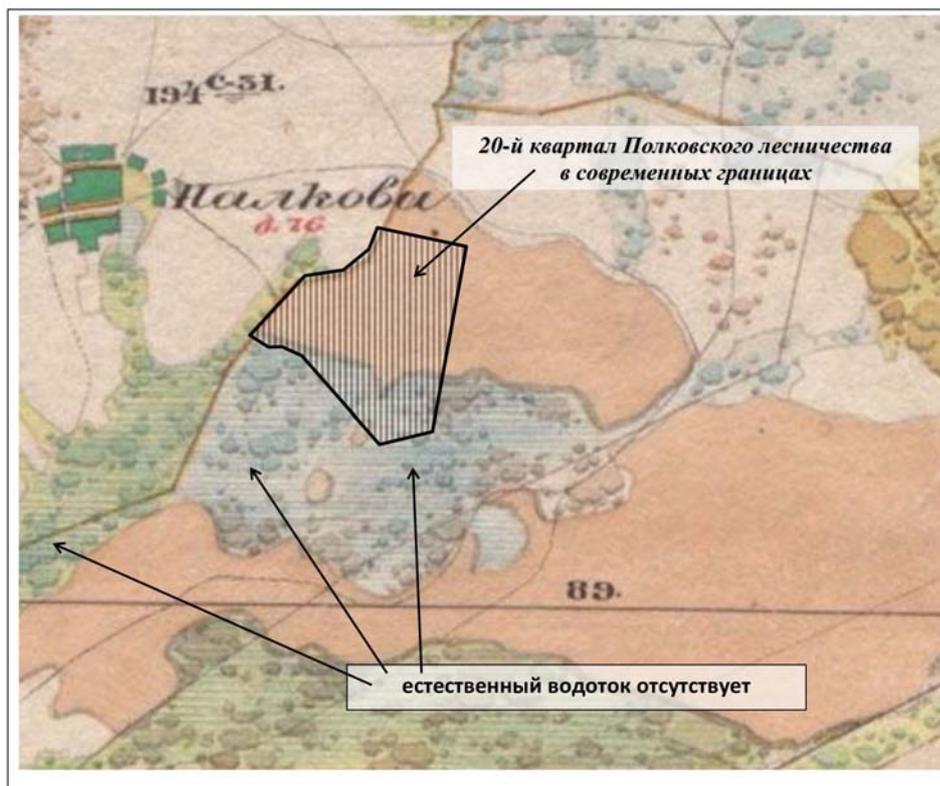


Рис. 3. Удельный вес горных пород Южной Мещеры как фактор создаваемых ими локальных гравитационных аномалий, н/м<sup>3</sup> (сост. по: [Плотность веществ ...])



а)



б)

Рис. 4. Рельеф и гидрологические процессы в северной части Полянской равнины в настоящее время и в середине XIX века: а — гипсометрическая карта; б — состояние местности в середине XIX века (фрагмент атласа А. И. Менде, см.: [Топографический межевой атлас ... , 1860]).

На гидрологический режим, почвенные и биопродукционные процессы непосредственное влияние оказывает морфология кровли регионального водоупора — юрских глин, которые подстилают четвертичные отложения на всей Полянской равнине (в отличие от расположенной севернее Пяткинской возвышенности, где коренными породами являются неогеновые пески, в верхней части толщи — неоген-эоплейстоценовые). Кровля юры залегает на абсолютной высоте 92–95 м (что и определяет мощность водоносных горизонтов в четвертичных породах, равную 18–20 м), формируя уклон к юго-юго-западу, который наследуется рельефом топографической поверхности (рис. 2, 4а). При этом перепады высот современного рельефа примерно в два раза меньше, чем погребенного донеоплейстоценового (рис. 2), что обусловлено аккумулятивным характером развития рельефа Мещеры в ледниковья и особенно межледниковья (см.: [Кривцов, 1998]).

Из гидрологических объектов в северной части Полянской равнины расположены горизонты грунтовых вод мощностью 18–20 м, небольшое термокарстовое озеро глубиной до 1,5 м, имеющее местное название Пьянишное, а также мелиоративная система канала Плотина. В середине XIX века естественный водоток на месте современного канала отсутствовал, имелась лишь заболоченная ложбина (рис. 4б), вследствие чего поверхностный сток был затруднен и гидроморфизм на нижних гипсометрических уровнях значительно превышал современный.

Тем самым мелиорация Полянской равнины может быть признана успешной, поскольку на данной территории она конформна геоморфологическим факторам — «раскрывает гидродинамический потенциал» погребенных локальных морфоструктур, не получивший должного развития в условиях господства песчаных субстратов в плейстоцене и голоцене. Мелиоративное воздействие такого рода благоприятно сказывается и на продуктивности дренируемых зональных экосистем: как показано ниже, имеются признаки сохранения ими вегетационной активности и в холодное полугодие как результат оптимальной глубины и динамики грунтовых вод.

Структуры почвенного покрова Полянской равнины также определяются ее склоновым положением. Абсолютные высоты в пределах изученной части равнины закономерно убывают с севера на юг с 123 до 114 м, что для Мещерской низменности является значительным градиентом.

В соответствии с особенностями гипсометрического положения зональные почвы Мещеры, *дерново-подзолистые автоморфные*, сформированы главным образом на высотных отметках 122–123 м и тяготеют к периферии Пяткинской возвышенности (наиболее дренированные позиции). Поверхности на абсолютных высотах 122–115 м характеризуются большим гидроморфизмом; в их пределах преобладают *дерново-подзолистые глееватые почвы*, переходящие на еще более сниженных участках в *другие подтипы болотно-подзолистых почв* (в частности, в *дерново- и перегнойно-подзолистые глеевые*). В связи с тем, что в валдайскую эпоху на переувлажненной поверхности 2-й террасы развивались термокарстовые процессы, в ее пределах сохранилось значительное количество западин и котловин относительной глубиной от 0,4 до 5 и более метров, занятых гидроморфными сосново-березовыми лесами на *дерново-подзолистых грунтово-оглеенных почвах* (по периферии развиты сосняки черничники и брусничники на дерново-подзолистых глееватых почвах).

С одной стороны, склоновое положение Полянской равнины увеличивает динамику грунтовых вод, но с другой, такая динамика все же не столь высока вследствие ее ориентированности в сторону масштабных погребенных депрессий с более водозастойным режимом. Это определяет господство на изученной территории болотно-подзолистых почв и формирование в его центральной части — в точке сходимости нескольких транзитных грунтовых потоков (рис. 4а) — заболоченной котловины термокарстового генезиса (оформилась в валдайскую ледниковую эпоху в условиях преобладания притока влаги над ее оттоком). Однако склоновое положение не привело к формированию в пределах котловины классического низинного болота со слоем торфа свыше 30 см: отток влаги затруднен, но не блокирован, и указанную котловину следует относить к категории заболоченных земель, а не болот.

Несмотря на различия режимов почвообразования, положение в несколько разных гипсометрических условиях в минимальной степени влияет на гранулометрический состав почв (табл. 1): все почвы в пределах Полянской равнины, как приводораздельные, так и слабо дренированные, относятся к категории малоплодородных рыхло-песчаных, и рост в почвах склоновых позиций мелкого песка и крупных алевритов не меняет общий характер почвообразования. Реакция почвенных растворов кислая и на склонах термокарстовых микропонижений еще больше снижается вследствие накопления и активного сбраживания органики в гидроморфных условиях.

Таблица 1

Физико-химические особенности гумусовых горизонтов болотно-подзолистых почв северной части Полянской наклонной равнины

Параметр		Приводораздельная позиция	Склоновая позиция	
Гранулометрический (механический) состав	Механические фракции, % по массе	крупный и средний песок (1–0,25 мм)	72,3	58,6
		мелкий песок (0,25–0,05 мм)	21,8	30,1
		крупная пыль (0,05–0,01 мм)	2,7	6,7
		средняя пыль (0,01–0,005 мм)	1,2	2
		мелкая пыль (0,005–0,001 мм)	1,6	2
		ил (менее 0,001 мм)	0,4	0,6
Краткое название почвы		рыхло-песчаная*, песок**	рыхло-песчаная*, суглинистый песок**	
Гумус, %		1,5	4,05	
рН почвенных растворов	значения	4,11	3,92	
	ранг кислотности	кислая	сильнокислая	

Примечание: \* — по Н. А. Качинскому (СССР); \*\* — по А. Аттенбергу (Швеция).

### Результаты и обсуждение

**Гидрохимические и гидродинамические процессы.** При обобщении данных бурения и выявлении пространственных отношений многочисленных термокарстовых озерных котловин нами установлена эмпирическая закономерность, справедливая, по меньшей мере, для ландшафтов юго-западной Мещеры: взаимное расположение озер в пространстве неслучайно и подчиняется принципу золотого сечения. При этом в рамках озерных групп, сформированных в пределах положительных морфоструктур (возвышенностей погребенного коренного рельефа), фиксируется коэффициент отношений расстояний между отдельными водоемами, равный примерно 1,62 — золотая пропорция в первой степени (рис. 5), а в контурах отрицательных морфоструктур (вогнутые склоны погребенных эрозионных депрессий и т. д.) такой коэффициент равен 2,62 — квадрат золотой пропорции (как, например, в соотношениях периодов обращения большинства планет Солнечной системы). Наибольшим гравитационным потенциалом обладают локальные массивы коренных пород с максимальной плотностью (рис. 3) — доюрские известняковые останцы и толщи песчаных образований аллювиального генезиса (сортированные обводненные и ожелезненные пески): в юго-западной Мещере таких массивов два — Пяткинский и Бельский (рис. 2, 5). Предположительно, указанная закономерность может быть экстраполирована и на более обширную территорию (всю Мещерскую низменность и даже шире), поскольку в ее основе лежит универсальный для любых геолого-геоморфологических (и, соответственно, ландшафтно-генетических) процессов гравитационный фактор (см.: [Солнцев, 2013]).

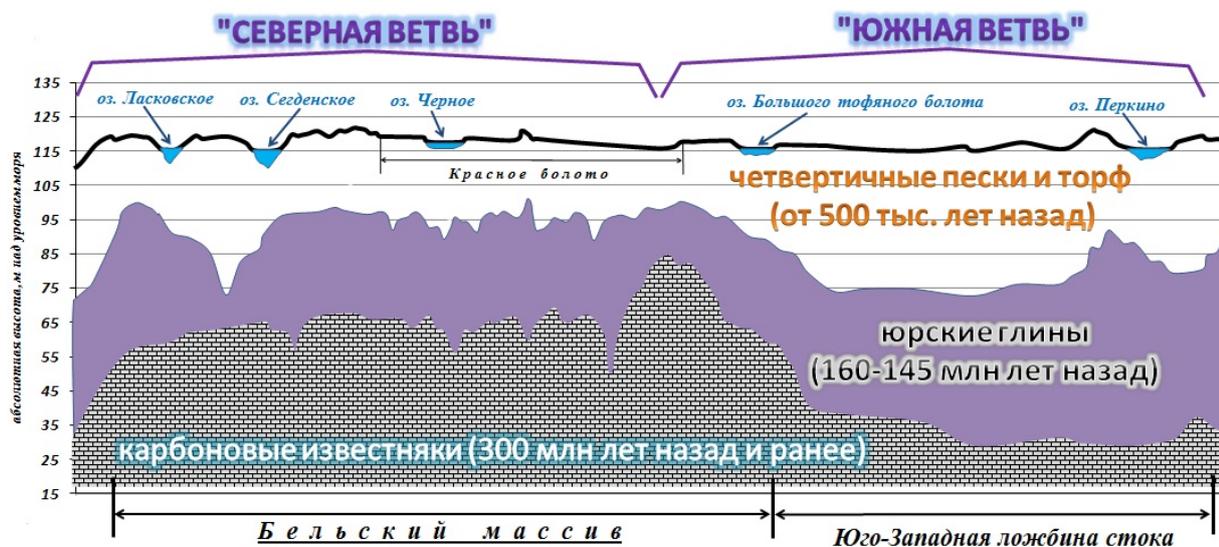


Рис. 5. Геолого-геоморфологический профиль по линии разлома, порождающего «Главную озерную полосу» Южной Мещеры

*Примечание.* В рамках «северной ветви» (Ласковской озерной группы) расстояние между озерами убывает в 1,62 раза с удалением от высшей точки Бельского известнякового массива (коэффициент золотой пропорции в первой степени в границах выпуклого склона положительной морфоструктуры), в рамках «южной ветви» расстояние возрастает в 2,62 раза (квадрат золотой пропорции в контурах вогнутого склона и тальвега эрозионно-тектонической ложбины). Разломом, по которому заложена «Главная озерная полоса», является северный борт Рязано-Саратовского авлакогена, подвижки по которому на данном участке имеют признаки активизации (см.: [Зыков, Полешук, 2015]), очевидно, под влиянием надвига со стороны Среднерусской возвышенности.

Таким образом, Пяткинская возвышенность благодаря особенностям вещественного состава слагающих ее пород формирует гравитационную аномалию, выходящую далеко за пределы ее границ, в которую полностью вовлечена территория Полянской равнины — основного объекта наших исследований. Именно об этом свидетельствует четкая математическая закономерность — соблюдение правила золотого сечения — в размещении термокарстовых котловин относительно водораздельной точки возвышенности, представленная на рисунке 6.

Указанная закономерность четко фиксирует функциональные особенности положения Полянской равнины: это не просто склоновая морфоструктура, а склон, ориентированный в сторону Полковской и Варсковской депрессий (Пг и Пл на рис. 1) с более водозастойным режимом (квадрат золотой пропорции (рис. 6)). Это определяет относительно более затрудненную гидродинамику природных комплексов этой части Мещерской низменности и, одновременно, их высокую отзывчивость на осушительные мелиорации.

Подчеркнем также, что принцип золотого сечения, лежащий в основе взаимного расположения озерных котловин (отчасти также и голоценовых пойменных структур — вероятно, бывших термокарстовых впадин, вовлеченных в пойменный режим), свидетельствует о зрелости и целостности ландшафтной структуры Мещеры и о ее развитии за счет внутренних литогенетических и морфоструктурных факторов. Это свидетельствует также о системообразующей роли локальных аномалий гравитационного поля в ландшафтно-генетических процессах и о некорректности гипотез о внешних, случайных по отношению к ландшафтной морфологии, факторах происхождения мещерских озер (падения метеоритов и т. д.).

Водная масса озера Пьянишного также вовлечена в указанные выше гидродинамические процессы. Оно, подобно большинству мещерских озер, имеет питание и сток через водопроницаемую песчаную толщу четвертичных отложений, в связи с чем в существенных чертах отражает гидрохимию и гидродинамику грунтового стока и предстает для характеристики местных особенностей подземных вод.

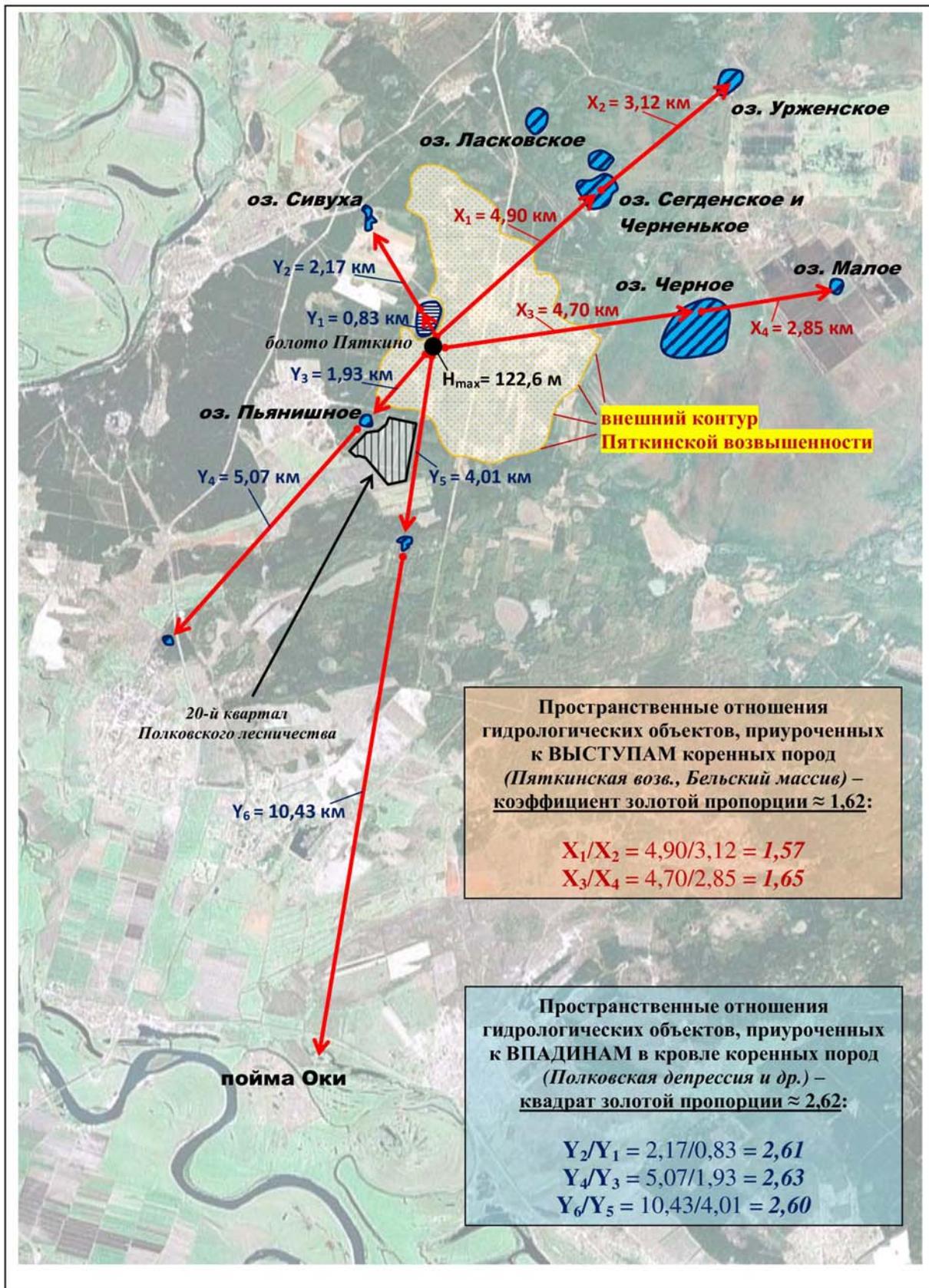


Рис. 6. Гравитационная аномалия Пяткинской возвышенности как фактор гидрологических процессов в ландшафтах юго-западной Мещеры

Как свидетельствуют данные таблицы 2, гидродинамика в пределах Полянской равнины характеризуется средней интенсивностью: благодаря склоновому положению она выше, чем в контурах Полковской депрессии, но ниже, чем в гидрологических объектах с достаточно интенсивным для Мещеры водообменном в сходных ландшафтно-геохимических условиях.

Таблица 2

Минерализация поверхностных вод юго-западной Мещеры как индикатор интенсивности гидродинамики и ее факторы

Гидрологические объекты*		Минерализация (мг/л)	Примечание*
Группа более проточных озер	озера Сегденское, Черненькое, Уржинское, Малое (Поганое)	19–22	водообмен усиливается гравитационными аномалиями погребенных положительных морфоструктур, сложенных более плотными породами (Пяткинской возвышенности и Бельского известнякового массива)
«Промежуточная» группа	озера Ласковское и Пьянишное, урочище Пяткино	24–30	склоны отрицательных морфоструктур — погребенных эрозионных врезов, в первую очередь доюрских (Полковской депрессии, Северной ложбины)
Водоемы с замедленным водообменом	озеро Сивуха и более мелкие водоемы	27–48	в контурах отрицательной морфоструктуры (Полковской депрессии)

Примечание: \*упомянутые элементы ландшафтной структуры показаны на рисунках 5, 6.

Цветность воды (параметр, зависимый от влияния водорастворимой органики на гидрохимию местного стока) указывает на ту же закономерность: в водах озера Пьянишного (64,9° хром-кобальтовой шкалы) она выше, чем в Солотчинской старице (17,2°) и, например, в более проточном и глубоком озере Сегденском (41,6°), но значительно ниже, чем в озерах и водотоках, дренирующих торфяники (как правило, 150–350°). Отметим также, что воды озера Пьянишного (и, соответственно, грунтовые воды прилегающей территории в целом) характеризуются химическим составом, в большей степени связанным с атмосферными осадками и находящимся в начальной стадии преобразования почвенной толщей (чему способствуют инертность песков Мещеры и нахождение в верхней части склона Полянской равнины). Об этом, в частности, свидетельствуют низкие значения pH — 5,65, что близко к реакции атмосферных осадков в условиях геохимического равновесия с углекислым газом атмосферы (тогда как в Солотчинской старице — конечном звене водной миграции ландшафтов юго-западной Мещеры — 6,40).

Поверхностный сток зависит от зональных и местных (ландшафтных) факторов. Пространственная дифференциация модуля годового стока определяется в основном зонально-климатическими особенностями (закономерный рост с юго-запада на север Рязанской области), в пределах основного района исследований данная величина составляет 5,11 л/с×км<sup>2</sup>. Летний меженный сток (особенно в экстрааридном летнем сезоне 2010 года) более зависим от азональных и антропогенных факторов, его модуль составляет 0,205 л/с×км<sup>2</sup> (рис. 7). Это в 4 раза больше зональной нормы для ландшафтов Мещеры, но в 2,5 раза меньше, чем в сильно дренированных каналами бассейнах малых рек Кельцевская канава, Белая и Кадь.

Тем самым мелиоративная система канала Плотины, безусловно, стимулирует отток грунтовых вод с территории Полянской равнины, но ее влияние заметно меньше, чем в мелиорированных геосистемах центральной Мещеры (в частности, вследствие ориентировки равнины в сторону локальных депрессий и их «подавляющего» воздействия на течения грунтовых вод (см. рис. 6)). Антропогенно инспирированный рост модуля стока для мещерских ландшафтов далеко не всегда благоприятен: из-за избыточного осушения регулярно случаются масштабные лесо-торфяные пожары. В частности, в 2010 году очаги возгорания были сконцентрированы в геосистемах, где модуль меженного стока превышал 0,40 л/с×км<sup>2</sup>, вследствие чего изучаемая

территория, где данный параметр был вдвое ниже пороговой величины, не была затронута пожарами по причине благоприятного, оптимального соотношения осушительной мелиорации с природным морфоструктурным фактором гидродинамики.

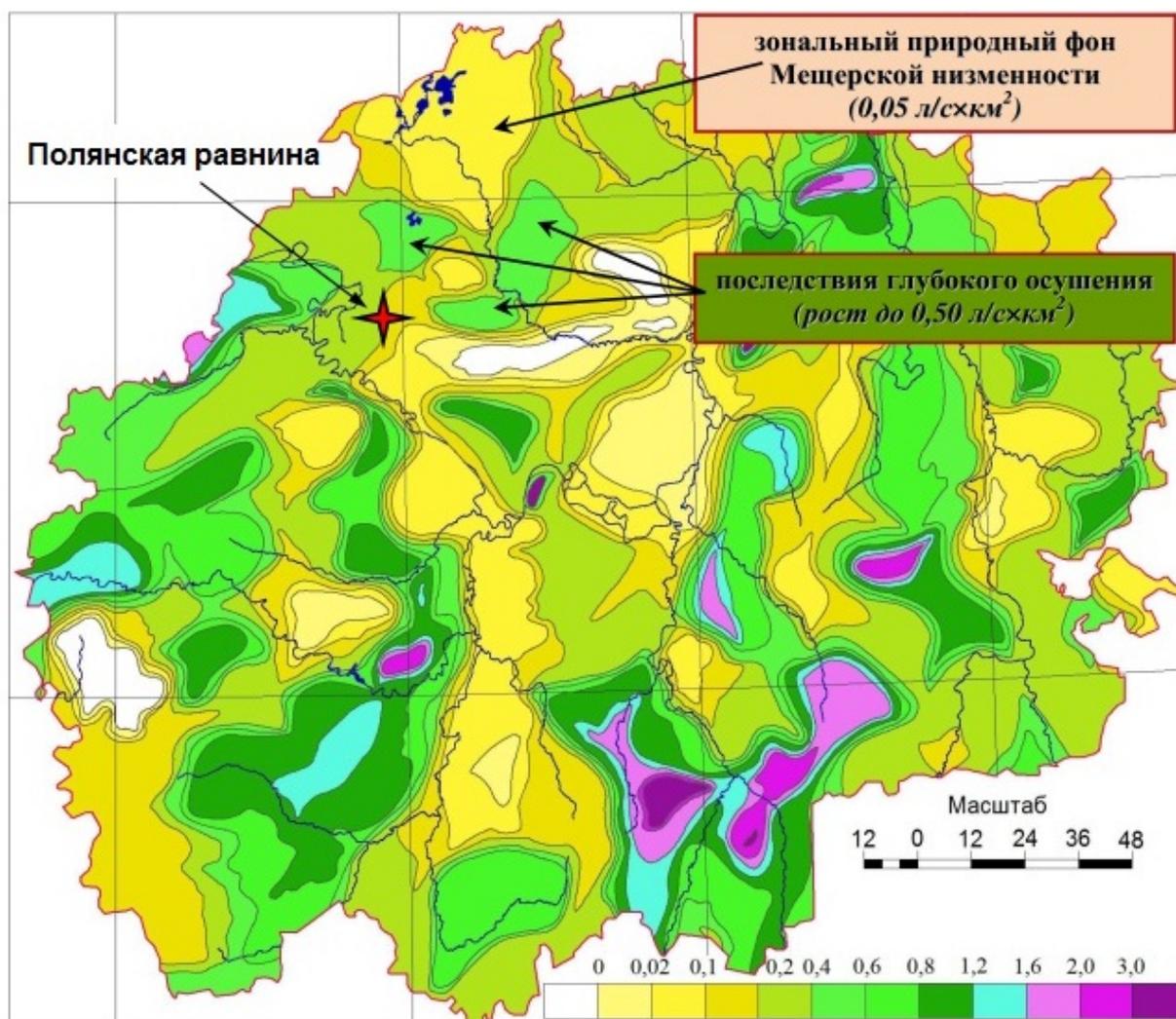


Рис. 7. Картограмма модуля летнего межennaleго стока, л/(с×км<sup>2</sup>)  
(минимально возможная оценка: данные получены в период  
10 июля — 02 августа 2010 года)

**Аэроионный состав воздуха.** Концентрация аэроионов — информативная экологическая характеристика состояния атмосферы, которая, во-первых, тесно связана с ландшафтным покровом, во-вторых, отражает важный для человека гигиенический параметр приземного воздуха, и в-третьих, может быть оценена при помощи мобильного прибора (что позволяет учесть влияние ландшафтных неоднородностей любого масштаба). Ионизация молекул воздуха постоянно происходит естественным путем, при этом образуются ионы разной полярности. Биологическая роль отрицательных аэроионов (в основном это молекулы кислорода) наиболее изучена: они полезны для человека и усиливают обменно-окислительные процессы, стимулируют иммунитет, повышают жизненный тонус. Положительные аэроионы (ионизированный водяной пар) также необходимы, но в меньших масштабах (см.: [Аэроионизация воздуха ...]). Наиболее важны при этом хвойные породы, жизнедеятельность которых при определенных условиях может обеспечивать круглогодичную ионизацию воздуха за счет радионуклидов, содержащихся в их тканях (в основном <sup>222</sup>Rn, поглощаемого из почвенных и грунтовых вод).

Концентрация легких аэроионов — чрезвычайно изменчивый параметр, находящийся под влиянием направления и скорости воздушных потоков, активности биологических источников, высоты солнца, облачности и влажности воздуха, поглощающих свойств земной поверхности. Как правило, на равнинах лесной зоны с умеренно-континентальным климатом средняя концентрация отрицательных ионов в летние месяцы составляет 800–1400 см<sup>-3</sup>, в осенне-зимние месяцы 250–600 см<sup>-3</sup> (см.: [Биоклиматический паспорт ... , 2018]). Снижение природной ионизации воздуха в холодное полугодие связано с отсутствием лиственного покрова, с ростом облачности и относительной влажности, с уменьшением высоты солнца над горизонтом и освещенности.

Изучение природной ионизации воздуха на территории района исследований, проведенное нами 21–22 февраля 2022 года, позволило установить пространственные закономерности данного явления (рис. 8) и сделать следующие выводы.

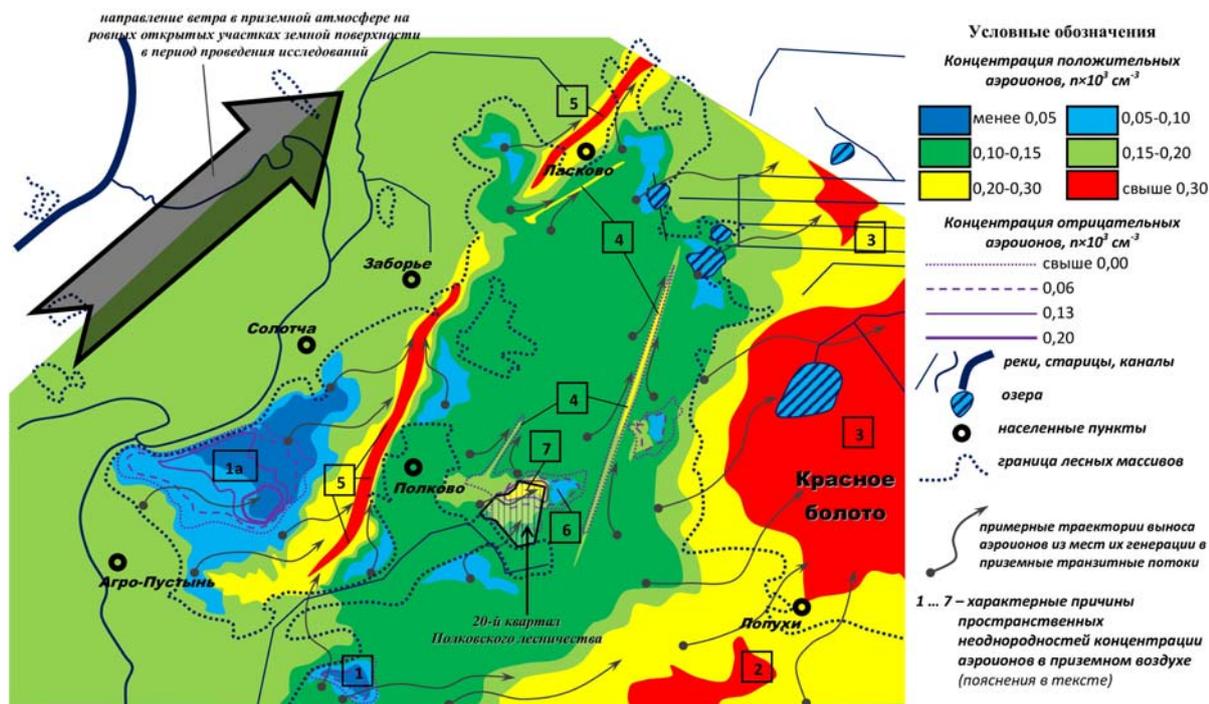


Рис. 8. Картограмма параметров природной ионизации атмосферного воздуха в юго-западной Мещере (третья декада февраля 2022 года)

1) Концентрация аэроионов обеих полярностей в период измерений находилась на низком уровне (что обусловлено сезонными и погодными факторами, охарактеризованными выше), наиболее полезные для человека отрицательные ионы в большинстве точек опробования отсутствовали. Тем не менее выявлены вполне отчетливые пространственные закономерности ионизации, наиболее показательные для распределения положительных ионов.

2) Минимальная ионизованность приземного воздуха отмечена под пологом старовозрастных сосняков и в целом в глубине плотных лесных массивов (обозначение 1 на рис. 8), характерным примером чего может служить урочище Монастырский бор к юго-востоку от Солотчи (обозначение 1а на рис. 8). Это обусловлено тем, что биогенная генерация ионов в холодное полугодие подавлена, а если и происходит, то зона такой генерации, в основном кроны сосен, приподнята над поверхностью земли и не совпадает с размещением как счетчика аэроионов, так и органов дыхания человека.

3) В приземной атмосфере формируются транзитные потоки аэроионов, приуроченные к «полуболотам» с разреженным растительным покровом (обозначение 2 на рис. 8), обширным незаросшим горельникам 2010 года на верховых болотах (обозначение 3 на рис. 8), крупным

просекам (обозначение 4 на рис. 8) (рис. 9а) и особенно автотрассам (обозначение 5 на рис. 8) — при условии, что их конфигурация корреспондирует с преобладающим направлением ветра. *Несовпадение зон генерации и транзита аэроионов — характерная черта лесных ландшафтов.*

4) Судя по полученным данным, отрицательные аэроионы во вторую половину зимы генерируются локально, в основном в молодых и приспевающих сосняках с повышенной интенсивностью обменных процессов и способностью сохранять ослабленную вегетацию и зимой (последнее в лесах Западной Европы вполне обычно: тонкие корни древесных растений растут и обновляются круглый год (см.: [Усольцев, 2002]), а в центре Русской равнины это наблюдается нерегулярно, в особо благоприятных условиях). Достаточно высока вероятность зимней вегетации хвойных на склонах возвышенностей, где близкое залегание грунтовых вод оказывает согревающее воздействие на корневые системы и делает возможным круглогодичный рост корней, питание и поглощение подземной влаги, содержащей  $^{222}\text{Rn}$  — основной ионизирующий агент. В условиях юго-западной Мещеры такими сообществами — круглогодичными генераторами аэроионов, как правило, являются саженные сосняки в транзитных геохимических позициях на периферии положительных морфоструктур — на склоне Солотчинского останцового массива (обозначение 1а на рис. 8) и на Полянской наклонной равнине (обозначение 7 на рис. 8) (рис. 9б).



а)



б)

Рис. 9. Элементы ландшафтного покрова юго-западной Мещеры, обеспечивающие относительно повышенную ионизацию приземного воздуха в зимний сезон

*Примечание:* а — просеки вокруг линий электропередачи как пути транзитной миграции легких аэроионов в приземных воздушных потоках; б — средневозрастные сосняки на наклонной Полянской равнине как генераторы аэроионов.

5) В процессе воздушной миграции аэроионы фракционируются, вследствие чего максимумы ионов положительной и отрицательной полярности обычно не совпадают (рис. 8). Например, на обширной делянке (обозначение б на рис. 8), на фоне низкой общей ионизации, от-

рицательные ионы преобладают над положительными (коэффициент униполярности  $K_{УП} = 0,95$ ), а всего в 800 м уже в 2 раза им уступают ( $K_{УП} = 1,92$ ). Однако северная периферия Полянской равнины в целом является уникальным природным комплексом, где имеет место совместная аккумуляция ионов двух полярностей (обозначение 7 на рис. 8). Этому способствует характерное сочетание природных факторов: господство источников ионизации — приспевающих сосняков, вегетирующих в зимний сезон, соседство с зонами транзитной миграции ионов из смежных лесных массивов (просеки вокруг ЛЭП (рис. 9а), пожарные разрывы, лесные дороги, вырубки), благоприятная погодная ситуация в момент измерений и т. д.

Примечательно при этом, что параметры ионизации меняются не только во времени, но и в пространстве весьма быстро, и характерный масштаб приземных воздушных масс с существенно различной ионной композицией невелик и сопоставим с частью лесного квартала («у каждой ландшафтной фации — свой климат»).

Важным индикатором экологического состояния почвенного покрова является **удельная активность радиоизотопов чернобыльского радиоактивного следа**, важнейший из которых —  $^{137}\text{Cs}$ . Как известно (см.: [Израэль, Де Корт, Джонес [и др.], 1998]), запасы радиоцезия в почвах Центра Русской равнины в основном сформировались на пятый день после аварии на Чернобыльской атомной электростанции 30 апреля 1986 года, чему способствовал изменившийся тип атмосферной циркуляции — воздушный перенос радиоактивных продуктов в сторону Скандинавии сменился субширотным потоком, ориентированным на Южный Урал и Восточную Сибирь, причем район исследований оказался непосредственно на границе радиоактивного шлейфа (рис. 10). Выведению радионуклидов на поверхность почвы способствовали также осадки, выпадавшие при прохождении теплого фронта и сопровождавшиеся юго-западным ветром. На этом фоне проявилось влияние местных (ландшафтных) факторов — рельефа и неоднородностей растительного покрова, сформировавших мозаичную, сложную, но закономерную пространственную картину накопления  $^{137}\text{Cs}$  в почвах Южной Мещеры, в которой земли Полянской равнины занимают вполне определенное место.

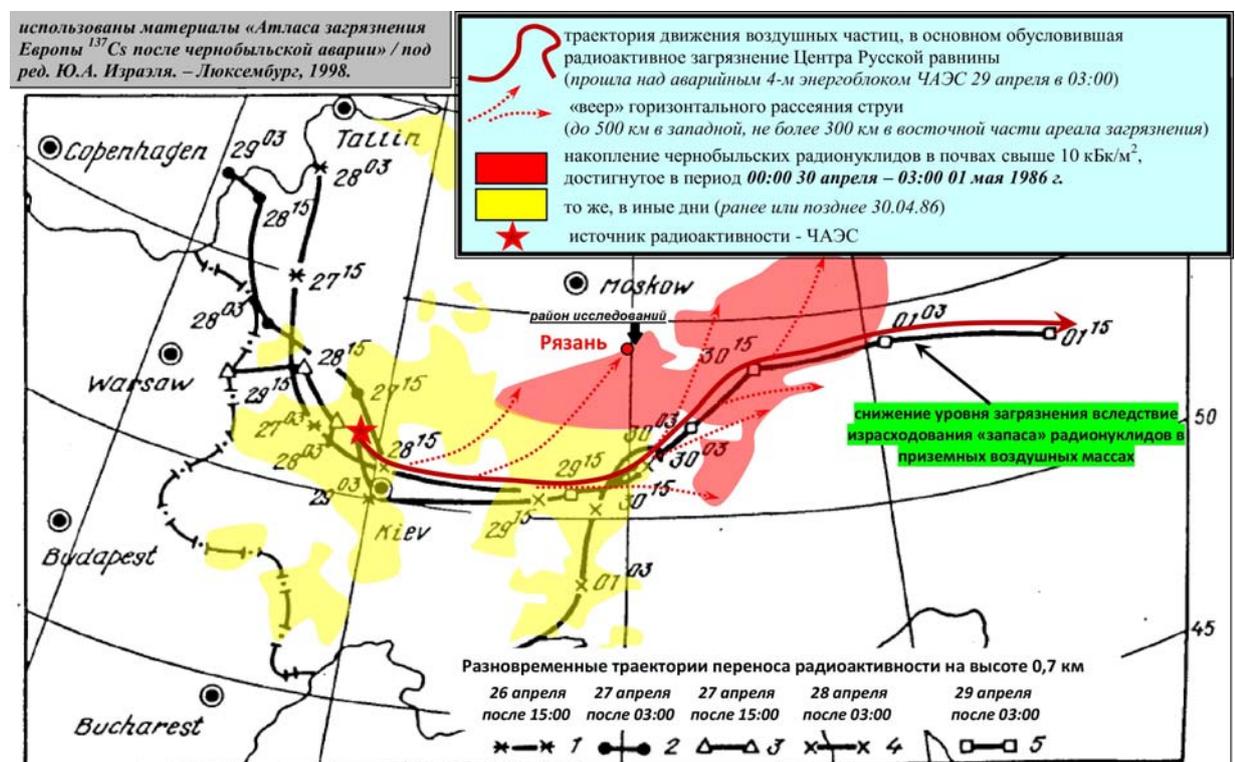


Рис. 10. Формирование чернобыльского радиоактивного следа на Русской равнине в апреле-мае 1986 года и локализация района исследований (см.: [Тобратов, Железнова, Костикова, Шилкина, 2023])

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почвах определена в ходе проведенных нами в январе-феврале 2022 года полевых исследований с привлечением данных, полученных ранее (при опробованиях 2008–2019 годов). При использовании архивных данных производился их пересчет на 01 февраля 2022 по формуле закона радиоактивного распада:

$$N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t},$$

где  $N(t)$  — число нераспавшихся атомов радионуклида в образце почвы на 01 февраля 2022 года;  $N_0$  — то же, в момент пробоотбора;  $e$  — основание натуральных логарифмов;  $\lambda$  — постоянная радиоактивного распада  $^{137}\text{Cs}$  ( $7,28 \times 10^{-10} \text{ c}^{-1}$ );  $t$  — период времени между опробованием и датой, на которую осуществлялся пересчет, с.

Ранжирование значений удельной активности радиоцезия осуществлялось на основании расчленения кривой распределения (рис. 11), что позволяет объективно выявить нормальные и аномальные диапазоны (см.: [Михеева, 1997 ; Михеева, Кузьмина, 2000]) (для  $^{137}\text{Cs}$  «нормальные» значения — понятие условное: это искусственный антропогенный радионуклид, чуждый ландшафтам на любом уровне его удельной активности). В частности, установлено, что диапазон модальных значений активности  $^{137}\text{Cs}$  соответствует 10–25 Бк/кг (на рис. 12 для большей детализации разбит на два поддиапазона — несколько выше и несколько ниже преобладающей «нормальной» величины); значения менее 10 Бк/кг трактуются как низкие, 20–50 Бк/кг — как повышенные, свыше 50 Бк/кг — как аномально высокие (в рамках данной выборки).

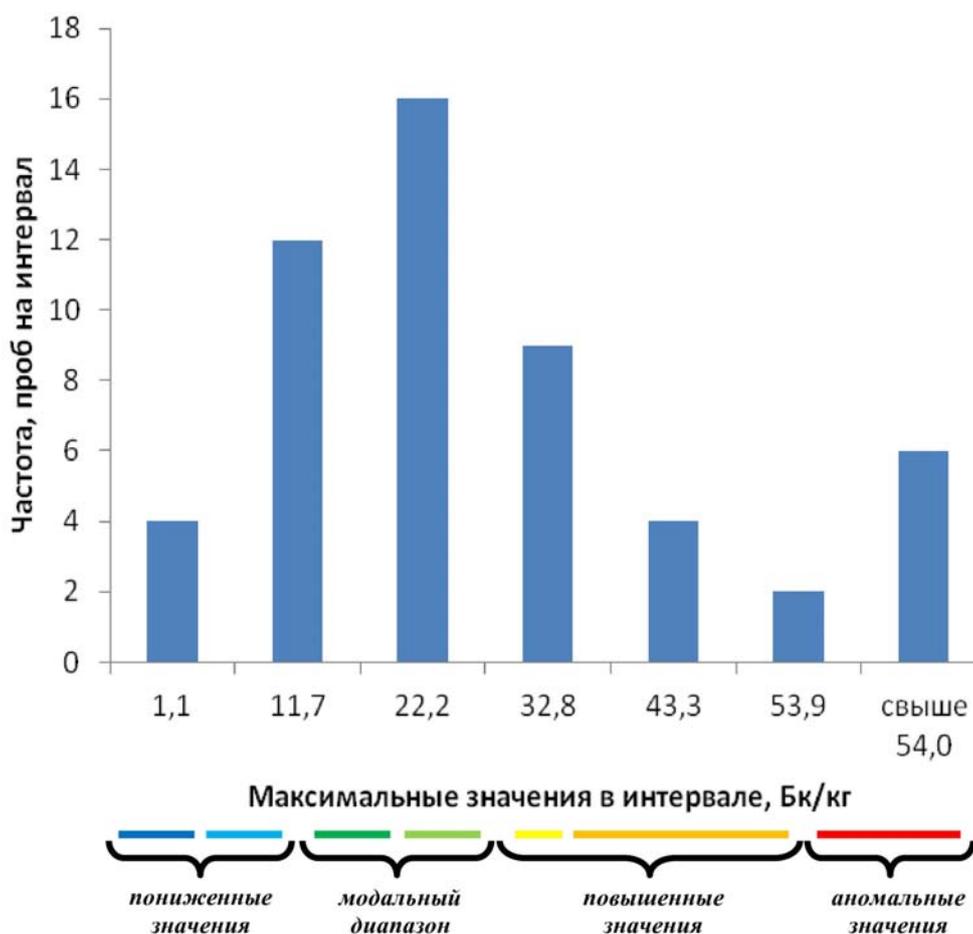


Рис. 11. Кривая распределения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах Южной Мещеры

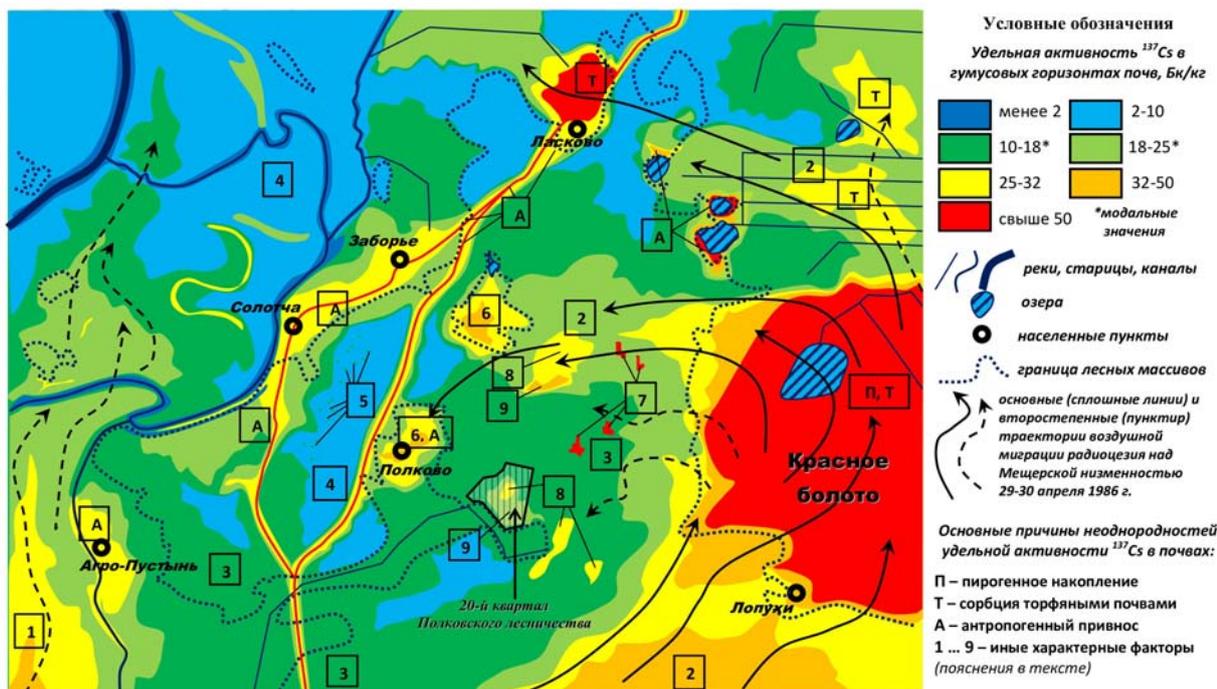


Рис. 12. Закономерности пространственного распределения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$

Действие указанных выше ландшафтных факторов на пространственное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в почвах сводится к следующему.

1) Общий характер распределения удельной активности радиоцезия не площадной, а скорее линейный: наибольшей плотности его атмосферная поставка достигла на «путях наименьшего сопротивления» — в контурах поймы Оки как наиболее сниженного блока рельефа (обозначение 1 на рис. 12) и на редколесных заболоченных (и «полуболотных») территориях в окрестностях обширного Красного болота (обозначение 2 на рис. 12). Последняя траектория в апреле 1986 года была преобладающей (очевидно, вследствие изначального соответствия юго-западному направлению ветра) и дала несколько ответвлений, одно из которых направлено в сторону села Полково и соответствует ареалу мелкоконтурных сосняков, чередующихся с заболоченными котловинами, обширными пустошами и делянками: такой «фильтрующий» тип растительности (дополнительно модифицированный рубками) типичен для инверсионной Пяткинской возвышенности, которая, соответствуя глубокому эрозионному врезу в юрские глины (рис. 2), сочетает черты дренированности и локального гидроморфизма. Таким образом, структура растительного покрова, обусловленная рельефом и геологическим строением и лишь во вторую очередь рубками, в немалой степени определила неравномерность загрязнения почв радиоцезием, а Красное болото явилось важным каналом проникновения воздушных потоков, несущих радионуклиды, в Мещерскую низменность. В данном аспекте пространственные закономерности радиоактивного загрязнения почв и концентраций аэроионов оказались сходными (рис. 8, 12): такие пространственные соответствия обусловлены влиянием морфологии мещерских ландшафтов на воздушные потоки и не являются случайными.

2) В то же время возвышенная Солотчинская останцовая местность и смежные территории, покрытые сосняками с плотными опушками, были обойдены аэральными потоками радиоцезия (обозначение 3 на рис. 12): минимальная удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  наблюдается в старовозрастных сосняках к востоку от Солотчи, а также в Заборьевской пойме Оки, оказавшейся в ветровой тени солотчинского останца (обозначение 4 на рис. 12).

3) Сразу после 30 апреля 1986 года началось перераспределение радионуклидов в почвах под влиянием природных и антропогенных факторов. Из природных отметим процесс, характерный для бугристо-западинного рельефа Солотчинской останцовой местности, — вынос из почв бугров

и накопление в межбугровых понижениях (обозначение 5 на рис. 12), причем различия активности  $^{137}\text{Cs}$  могут превышать 3 раза (по нашим данным — соответственно 4 и 13 Бк/кг).

4) Для изученной территории чрезвычайно характерно антропогенное обогащение почв радиоцезием в черте населенных пунктов и особенно по обочинам основных автомагистралей, а также в местах с максимальной посещаемостью рекреантами (например, прибрежная зона озер Черненькое, Сегденское и Ласковское). Именно по причине антропогенного привноса  $^{137}\text{Cs}$  наиболее возвышенный участок Солотчинского массива и расположенный на нем Монастырский бор, вопреки природным факторам, отличаются не минимальными (2–5 Бк/кг), а средними или повышенными (19–30 Бк/кг) значениями удельной активности данного нуклида, а в контурах придорожного полотна автотрассы Рязань — Солотча — Заборье удельная активность входит в диапазон максимальных значений (свыше 58 Бк/кг).

5) Не менее мощным, но уже природным фактором аккумуляции радиоцезия в почвах является сорбция торфяниками, где его активность всегда несколько выше, чем в окружающих песчаных субстратах, и колеблется в пределах 25–195 Бк/кг. Особенно заметное обогащение радиоцезием характерно для торфяных почв в пределах основных траекторий чернобыльского радиоактивного следа (сплошные стрелки на рис. 12). Данное явление усугубляется пирогенным концентрированием радионуклидов после торфяных пожаров ( $^{137}\text{Cs}$  лишь частично, на 42–44 %, возгоняется при горении торфа, а свыше половины его запаса остается в золе, что в совокупности со снижением объема золы и создает эффект концентрирования (см.: [Тобратов, Железнова, 2016])). Пирогенное концентрирование  $^{137}\text{Cs}$  особенно характерно для Красного болота (рис. 12), которое в 2007 и 2010 годах прогорало почти на всей площади; здесь в золо-угольном горизонте удельная активность данного радионуклида превышает 800 Бк/кг (впрочем, быстро снижаясь с глубиной).

6) Антропогенные модификации лесных массивов (рубки разных типов) часто создают благоприятные условия для распространения атмотехногенных потоков. Так, относительно повышенное накопление  $^{137}\text{Cs}$  зафиксировано нами на землях пустошей на месте бывших сельхозугодий (обозначение 6 на рис. 12) и особенно в почвах крупных делянок (обозначение 7 на рис. 12). В последнем случае отмечен рост удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в 3,5 раза относительно модальных значений, что следует признать неожиданным, но надежным свидетельством большой роли морфологии растительного покрова как фактора миграции и аккумуляции техногенных элементов. Локальные заболоченные котловины в связи с угнетением древесной растительности формируют растительный полог фильтрующего типа и действуют на атмотехногенные потоки аналогично (обозначение 8 на рис. 12).

7) Несмотря на высокую водопроницаемость песков, стимулирующих вертикальный водный вынос радиоцезия, в ряде случаев наблюдается не вертикальная, а латеральная миграция  $^{137}\text{Cs}$  по рельефу, что приводит к его накоплению в почвах протяженных склонов и сырых понижений (обозначение 9 на рис. 12).

Основная территория исследований — Полянская наклонная равнина — в апреле 1986 года находилась в стороне от основных траекторий воздушной миграции радиоцезия, будучи экранированной лесными массивами с плотными опушками на периферии Мещеры (обозначение 3 на рис. 12); зона основного переноса  $^{137}\text{Cs}$  соответствовала более гидроморфным и «редколесным» территориям в контурах доюрских эрозионных врезов (Варсковская депрессия — Красное болото: рис. 1, 5 и 12). В связи с этим удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почвах северной (приводораздельной) части Полянской равнины ниже модальных значений (17,2 Бк/кг), незначительно (до 23,8 Бк/кг) повышается вниз по склону под влиянием латеральной миграции (обозначение 9 на рис. 12) и достигает 28,7 Бк/кг в гумусированных болотно-подзолистых почвах. Указанные значения в 2,5–4,0 раза меньше наблюдаемых в почвах урочища Журавлева вырубка (обозначение 7 на рис. 12), где радиоцезий накапливался вследствие фильтрующего характера древесной растительности.

Тем самым, вследствие «перехвата» аэрогенного  $^{137}\text{Cs}$  в смежных локальных природных комплексах, на Полянской равнине не сложилось условий для существенного обогащения почв радионуклидами. Однако склоновое положение равнины стимулирует перераспределение радиоцезия по почвам разных гипсометрических уровней: коэффициент латеральной дифференциации в минеральных песчаных почвах составляет 1,38, а с учетом дерново-подзолистых грунтово-оглеенных почв локальных гидроморфных депрессий достигает 1,67.

## Заключение

Результаты исследования свидетельствуют, что в Мещерской природной провинции в целом и в районе основных исследований, Полянской ландшафтной местности в частности, отчетливо проявляется системообразующая роль морфоструктурного фактора и его регуляторная функция в отношении процессов функционирования ландшафтов. Так, гидрологические особенности территории исследований определяются гравитационным влиянием смежной Пяткинской возвышенности и депрессирующим воздействием на водообмен отрицательных лито- и тектоморфоструктур, с определенным вкладом осушительной мелиорации. Индикаторами уровня водообмена являются: математические закономерности в соотношениях расстояний между озерными котловинами (квадрат золотой пропорции в зонах локальных ложбин и прогибов), минерализация поверхностных вод и модуль минимального меженного стока. Данные показатели свидетельствуют о среднем уровне гидродинамики в северной части Полянской равнины как о результате балансировки всего комплекса гидрологических факторов; мелиоративная система канала Плотины активизирует отток грунтовых вод, но пороговое для Мещеры значение летнего меженного стока, однозначно свидетельствующее об избыточной дренированности и высокой пожароопасности ( $0,40 \text{ л/с} \times \text{км}^2$ ), не достигается.

Природная ионизация воздуха — сложный изменчивый процесс, имеющий тем не менее свои устойчивые географические закономерности. Результатами проведенных исследований фиксируется роль хвойных лесов на склонах положительных морфоструктур как природных источников ионизации в зимний сезон и ландшафтно-геоморфологические факторы перераспределения аэроионов. Примечательно, что на северной периферии Полянской равнины наблюдается сочетание природных условий, благоприятствующее накоплению в приземной атмосфере аэроионов как положительной, так и отрицательной полярностей, чего не наблюдалось в иных пунктах опробования. Это характеризует данную территорию как источник гигиенически и экологически ценных для человека приземных воздушных масс, что также обусловлено ее геоморфологическим положением.

Рассмотренные выше пространственные закономерности накопления в почвах  $^{137}\text{Cs}$  важны не только сами по себе, но и как индикатор условий воздушной миграции любых техногенных элементов, в том числе местного происхождения. Распределение радиоцезия в почвах индицирует значительную роль рельефа и морфологии растительного покрова (которая, в свою очередь, непосредственно связана с рельефом топографической поверхности и погребенными морфоструктурами) в формировании траекторий воздушных переносов загрязняющих веществ.

В связи с этим представляется актуальным придание охранного статуса лесным массивам на окраине Мещерской низменности: это позволит предотвратить глубокое проникновение воздушных потоков в Мещеру (в том числе в ценные для рекреантов природные комплексы) и будет способствовать их миграции в иных направлениях или рассеянию в средней и верхней атмосфере, что снизит риски импактного воздействия. По нашему мнению, изменение границ охранной зоны Государственного природного заказника «Солотчинский парк» и включение в его состав территории 20-го квартала Полковского лесничества, помимо иных целей, способствует реализации и данной задачи.

## Список источников

1. Анненская Г. Н., Мамай И. И., Цесельчук Ю. Н. Ландшафты Рязанской Мещеры и возможности их освоения / под ред. проф. Н. А. Солнцева. — М. : Изд-во МГУ, 1983. — 246 с.
2. Аэроионизация воздуха в медицине и на производстве. — URL : [https://ionization.ru/ru/articles/59\\_Ajeroionizacija-vozduha-v-medicine-i-na-proiz.html](https://ionization.ru/ru/articles/59_Ajeroionizacija-vozduha-v-medicine-i-na-proiz.html) (дата обращения: 08.04.2024).
3. Биоклиматический паспорт государственного бюджетного учреждения Рязанской области «Рязанский детский санаторий памяти В. И. Ленина». — М. : Ингеолком+, 2018. — 24 с.
4. Железнова О. С., Тобратов С. А. Опыт ландшафтного анализа пространственных закономерностей продуктивности зональных экосистем Южной Мещеры // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. — 2017. — № 6. — С. 47–62.
5. Зыков Д. С., Полещук А. В. Признаки горизонтальных движений воронежского выступа кристаллического фундамента на неотектоническом этапе // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение геологии. — 2015. — Т. 90, вып. 2. — С. 3–13.

6. Израэль Ю. А., Де Корт М., Джонес А. Р. [и др.]. Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии. — Люксембург : Люксембургское бюро для офици. изд. Европейск. сообществ, 1998. — 71 с.
7. Качинский Н. А. Физика почвы. — М. : Высш. шк., 1965. — Ч. 1. — 323 с.
8. Кривцов В. А. Рельеф Рязанской области (региональный геоморфологический анализ). — Рязань : Изд-во РГПУ им. С. А. Есенина, 1998. — 195 с.
9. Михеева И. В. Изменение пространственной variability свойств почвы при антропогенном воздействии // Почвоведение. — 1997. — № 1. — С. 102–109.
10. Михеева И. В., Кузьмина Е. Д. Анализ изменений свойств почвы по изменению их статистического распределения. — Новосибирск : ИПА СО РАН : «ЦЭРИС», 2000. — 23 с.
11. Плотность веществ, продуктов, жидкостей и газов при атмосферном давлении // Таблицы DPVA.info : инженерн. справ. — URL : <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsDensity/DensityTable/> (дата обращения: 09.02.2024).
12. Солнцев Н. А. Учение о ландшафте : избр. тр. — М. : Изд-во МГУ, 2001. — 383 с.
13. Солнцев В. Н. О гравитационной парадигме ландшафтоведения // Развитие идей Н. А. Солнцева в современном ландшафтоведении : ландшафтн. сб. — М. ; Смоленск : Ойкумена, 2013. — С. 155–169.
14. Тобратов С. А., Железнова О. С. Пирогенная и биогенная трансформация зольной части торфа (на примере Мещерской низменности) // Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана) : докл. всерос. науч. конф. — М. : Геогр. фак. МГУ, 2016. — С. 589–593.
15. 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.
16. Топографический межевой атлас Рязанской губернии / сост. в 1859 г. чинами Межевого корпуса под рук. Ген. штаба генерал-майора Менде. — М. : Имп. Рус. геогр. о-во : Корпус межевых инженеров, 1860.
17. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. — Екатеринбург : УРО РАН, 2002. — 760 с.

#### References

1. Annenskaya G. N., Mamay I. I., Tselchuk Yu. N. *Landshafty Ryazanskoj Meshchery i vozmozhnosti ikh osvoyeniya* [Landscapes of the Ryazan Meshchera and the possibilities of their development. Ed. by prof. N. A. Solntsev. Moscow, Moscow State University Publ., 1983, 246 p. (In Russian).
2. *Aeroionizatsiya vozdukha v meditsine i na proizvodstve* [Aeroionization of air in medicine and in production]. Available at: [https://ionization.ru/ru/articles/59\\_Ajeroionizacija-vozduha-v-medicine-i-na-proiz.html](https://ionization.ru/ru/articles/59_Ajeroionizacija-vozduha-v-medicine-i-na-proiz.html) (accessed: 08.04.2024). (In Russian).
3. *Bioklimaticheskij pasport gosudarstvennogo byudzhnogo uchrezhdeniya Ryazanskoj oblasti "Ryazanskiy detskiy sanatoriy pamyati V. I. Lenina"* [Bioclimatic passport of the state budgetary institution of the Ryazan Region "Ryazan Children's Sanatorium in Memory of V. I. Lenin"]. Moscow, Ingeolkom+ Publ., 2018, 24 p. (In Russian).
4. Zheleznova O. S., Tobratov S. A. Experience in landscape analysis of spatial patterns of productivity of zonal ecosystems of Southern Meshchera. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Ser. geograficheskaya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series Geographical]. 2017, iss. 6, pp. 47–62. (In Russian).
5. Zikov D. S., Poleshchuk A. V. Signs of horizontal movements of the Voronezh protrusion of the crystalline basement at the neotectonic stage. *Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdeleniye geologii* [Bulletin of the Moscow Society of Natural Scientists. Department of Geology]. 2015, vol. 90, iss. 2, pp. 3–13. (In Russian).
6. Izrael Yu. A., De Cort M., Jones A. R. [et al.]. *Atlas zagryazneniya Yevropy tseziyem posle Chernobyl'skoj аварии* [Atlas of cesium contamination in Europe after the Chernobyl accident]. Luxembourg, Luxembourg Bureau for official editions of European communities, 1998, 71 p. (In Russian).
7. Kachinsky N. A. *Fizika pochvy* [Physics of soil]. Moscow, Vyshchaya Shkola Publ., 1965, part 1, 323 p. (In Russian).
8. Krivtsov V. A. *Relyef Ryazanskoj oblasti (regionalnyy geomorfologicheskij analiz)* [Relief of the Ryazan Region (regional geomorphological analysis)]. Ryazan, Russian State Pedagogical University named for S. A. Yesenin Publ., 1998, 195 p. (In Russian).
9. Mikheeva I. V. Change in spatial variability of soil properties under anthropogenic influence. *Pochvovedeniye* [Soil Science]. 1997, iss. 1, pp. 102–109. (In Russian).
10. Mikheeva I. V., Kuzmina E. D. *Analiz izmeneniy svoystv pochvy po izmeneniyu ikh statisticheskogo raspredeleniya* [Analysis of changes in soil properties by changes in their statistical distribution]. Novosibirsk, IPA SO RAS, "TsERIS" Publ., 2000, 23 p. (In Russian).

11. Density of substances, products, liquids and gases at atmospheric pressure. *Tablitsy DPVA.info: inzhenern. sprav.* [DPVA.info tables: engineering reference]. Available at: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsDensity/DensityTable/> (accessed: 09.02.2024). (In Russian).
12. Solntsev N. A. *Ucheniye o landshafte: izbr. tr.* [Teaching about landscape: selected works]. Moscow, Moscow State University Publ., 2001, 383 p. (In Russian).
13. Solntsev V. N. On the gravitational paradigm of landscape science. *Razvitiye idey N. A. Solntseva v sovremennom landshaftovedenii: landshaftn. sb.* [Development of N. A. Solntsev's ideas in modern landscape science: landscape science]. Moscow, Smolensk, Oykumena Publ., 2013, pp. 155–169. (In Russian).
14. Tobratov S. A., Zheleznova O. S. Pyrogenic and biogenic transformation of the ash part of peat (on the example of the Meshchera lowland). *Geokhimiya landshaftov (k 100-letiyu A. I. Perelmana): dokl. vseros. nauch. konf.* [Geochemistry of landscapes (on A. I. Perelman's 100<sup>th</sup> anniversary): reports from All-Russia scientific conference]. Moscow, Geography Dept. of Moscow State University Publ., 2016, pp. 589–593. (In Russian).
15. Tobratov S. A., Zheleznova O. S., Kostikova O. S., Shilkina Yu. N. Experience in analyzing the influence of flat terrain on air currents in the borderline layer of the atmosphere (according to expedition-based radio sounding data). *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta imeni S. A. Yesenina* [Bulletin of the Ryazan State University named for S. A. Yesenin]. 2023, iss. 3 (80), pp. 169–189. (In Russian).
16. *Topograficheskiy mezhevoy atlas Ryazanskoy gubernii* [Topographic boundary atlas of the Ryazan Province]. Comp. in 1859 by Land Survey Corps under the leadership of General-Major Mende. Moscow, Imp. Rus. geogr. society: Corps of Survey Engineers Publ., 1860. (In Russian).
17. Usoltsev V. A. *Fitomassa lesov Severnoy Yevrazii: normativy i elementy geografii* [Phytomass of forests of Northern Eurasia: standards and elements of geography]. Yekaterinburg, URO RAS Publ., 2002, 760 p. (In Russian).

#### *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 при кафедре физической географии и методики преподавания географии Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

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

#### *Information about the authors*

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

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

**Zheleznova Olga Sergeevna** — candidate of biology, junior researcher of the research laboratory of landscape geochemistry at the Department of Physical Geography and Geography Teaching Methods of Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

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

Статья поступила в редакцию 20.01.2024; принята к публикации 14.03.2024.

The article was submitted 20.01.2024; accepted for publication 14.03.2024.