

УДК: 910.27+613.1

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-153-170

Ф. Н. Лисецкий<sup>1</sup>, Ж. А. Буряк<sup>2</sup>, П. А. Украинский<sup>3</sup>

## ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ОБУСЛОВЛЕННОСТИ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

### АННОТАЦИЯ

Современные исследования направленных изменений климата, которые нацелены на выявление неоднородности трендов как по территории, так и во времени, активно используют пространственный анализ и результаты картографирования, преодолевая проблему преобразования дискретных данных от ограниченного количества метеостанций в условную континуальную поверхность. Цель работы состояла в использовании геоинформационных технологий для установления пространственных закономерностей распределения климатических затрат энергии на почвообразование на территории Крымского полуострова по трем временным срезам: для двух 30-летних периодов климатических норм, установленных Всемирной метеорологической организацией (а именно — 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг.), и ретроспективного этапа (до 1960 г.). Метеорологические данные по показателям тепло- и влагообеспеченности, интегрированные в расчетные значения величин климатических затрат энергии на почвообразование для иррегулярно расположенных метеостанций, были преобразованы в графо-математические абстракции пространственного распределения оценочного параметра с помощью метода сплайна с натяжением (*Tension Spline*). Результаты картографирования пространственного распределения климатических затрат энергии на почвообразование показали, что они увеличились за два 30-летних периода (1961–1990 гг. и 1991–2020 гг.) по сравнению с предшествующим этапом на 8 % и 10 % соответственно. В то же время для современного периода (1991–2020 гг.) при общем увеличении энергозатрат на почвообразование на 72 % площади Крымского полуострова установлены территориальные различия в отдельных его частях. Если в центре и на юго-востоке полуострова отмечено существенное увеличение энергетического потенциала климата, то на южном берегу (к востоку от Ялты), напротив, отмечено снижение этого показателя. Полученные результаты и оценки энергетического потенциала климата за последние 30 лет создают информационную основу для определения эффективности ренатурации почв в режимах постагрогенного развития и реабилитационного земледелия.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геоинформационные технологии, метод сплайна, энергетика почвообразования, динамика климата

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, д. 85, Белгород, Россия, 308015, e-mail: [liset@bsu.edu.ru](mailto:liset@bsu.edu.ru)

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, д. 85, Белгород, Россия, 308015, e-mail: [buryak@bsu.edu.ru](mailto:buryak@bsu.edu.ru)

<sup>3</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, д. 85, Белгород, Россия, 308015, e-mail: [ukrpa@mail.ru](mailto:ukrpa@mail.ru)

Fedor N. Lisetskii<sup>1</sup>, Zhanna A. Buryak<sup>2</sup>, Pavel A. Ukrainskiy<sup>3</sup>

## GEOINFORMATION ANALYSIS OF CLIMATIC CONDITIONALITY OF SOIL FORMATION IN THE TERRITORY OF THE CRIMEA PENINSULA

### ABSTRACT

Modern studies of directional climate change, which are aimed at identifying the heterogeneity of trends both over territory and over time, actively use spatial analysis and mapping results to overcome the problem of converting discrete data from a limited number of meteorological stations into a conditional continuum surface. The purpose of the work was to use geoinformation technologies to establish spatial patterns of distribution of climatic energy costs for soil formation on the territory of the Crimean Peninsula across three time slices: for two 30-year periods of climate norms that were established by the World Meteorological Organization (1961–1990 and 1991–2020) and the retrospective stage (before 1960). Meteorological data on heat and moisture supply indicators were integrated into the calculated values of climatic energy costs for soil formation for irregularly located weather stations and then converted into grapho-mathematical abstractions of the spatial distribution of the estimated parameter using the Tension Spline method. The results of mapping the spatial distribution of climatic energy costs for soil formation showed that they increased over two 30-year periods (1961–1990 and 1991–2020) compared to the previous stage by 8 % and 10 %, respectively. Moreover, for the modern period (1991–2020), with a general increase in energy costs for soil formation by 72 % of the area of the Crimean Peninsula, territorial differences in its individual parts were established. If in the center and southeast of the peninsula a significant increase in the energy potential of the climate was noted, then on the southern coast (east of Yalta), on the contrary, a decrease in this indicator was noted. The results obtained and assessments of the energy potential of the climate over the past 30 years create an information basis for determining the effectiveness of soil renaturation in the regimes of post-agrogenic development and rehabilitation agriculture.

**KEYWORDS:** geographic information technologies, spline method, energy of soil formation, climate dynamics

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях ускоренное развитие компьютерных и космических технологий способствует тому, что в такой важной для всего человечества проблеме, как отслеживание траекторий изменения климата и его последствий, решающую роль стали играть методы геоинформатики и ДЗЗ [Рыбалко и др., 2021; *Eniolorunda*, 2014; *Shirokov, Vasiliev*, 2020; *Gabriele et al.*, 2023]. Пространственное моделирование и картографирование — неотъемлемые составляющие современных исследований климатических закономерностей в пространственно-временном отношении. На региональном уровне с использованием методов интерполяции данных из рассредоточенных метеостанций возможна визуализация климатической обстановки по временным периодам и оценка неоднородности пространственных трендов и скоростей изменчивости в пределах всей территории [Ивлиева и др., 2019; Буряк и др., 2024]. На ландшафтном уровне пространственные модели

---

<sup>1</sup> Belgorod State National Research University, 85, Pobedy str., Belgorod, 308015, Russia, e-mail: [liset@bsu.edu.ru](mailto:liset@bsu.edu.ru)

<sup>2</sup> Belgorod State National Research University, 85, Pobedy str., Belgorod, 308015, Russia, e-mail: [buryak@bsu.edu.ru](mailto:buryak@bsu.edu.ru)

<sup>3</sup> Belgorod State National Research University, 85, Pobedy str., Belgorod, 308015, Russia, e-mail: [ukrpa@mail.ru](mailto:ukrpa@mail.ru)

климатических показателей могут были скорректированы с использованием цифровых моделей рельефа, что позволяет отразить мезо- и микроклиматическую изменчивость, обусловленную геоморфологическими и почвенными условиями [Буряк, Терехин, 2020].

Изучение климата в Крыму имеет длительную историю, т. к. начало наблюдений относится в Севастополе к 1826 г., в Симферополе к 1831 г. и в Ялте к 1868 г. Дата 1930 г., когда вышла в свет монография «Климат Крыма» [Ленюгалов, 1930], знаменовала собой первое масштабное обобщение климата по отдельным элементам с их географическим распределением, используя данные по 104 пунктам наблюдений (действующим и прекратившим существование). Картографический компонент книги включал картосхемы с построением изотерм и изогий, а также выделением 10 климатических районов.

Современные исследования климата Крымского п-ова опираются на возможности ГИС. Изучение тренда климатических изменений на территории проводили путем ГИС-картографирования величин коэффициента увлажнения Высоцкого-Иванова по справочным данным издания 1960–70-х гг. и отдельно за последние 35 лет (1973–2009 гг.) [Ергина, Михайлов, 2010]. При помощи данных 15 метеостанций за 1985–2018 гг. и цифровой модели рельефа SRTM-3 показана результативность применения ГИС для картографирования теплообеспеченности по гелиотермическому индексу Хуглина [Рыбалко и др., 2020], а также пространственного варьирования сумм температур  $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Рыбалко и др., 2021]. Значительный вклад в понимание динамики метеопараметров на протяжении столетия внесли разработки Р. В. Горбунова [2022], которым составлены карты динамики полей температуры воздуха и атмосферных осадков в контексте смен циркуляционных эпох.

Климатическая норма представляет собой среднемноголетнее значение, рассчитанное в соответствии с требованиями Всемирной метеорологической организации (ВМО) за 30-летний период. Постоянное изменение климата определяет необходимость обновления климатических норм для отслеживания глобальных климатических аномалий относительно контрольного периода. В 2023 г. ВМО опубликовала обновленный сводный глобальный набор климатических данных за 1991–2020 гг.<sup>1</sup>, обновив климатический стандарт 1981–2010 гг. Для долгосрочной оценки изменений климата в качестве эталонной оценочной нормы сохранен период 1961–1990 гг.

Климатический блок в региональных атласах Крыма включает карту агроклиматического районирования с таблицей сумм температур за период  $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Агроклиматический..., 1959, с. 15], распределение суммарной солнечной радиации (год), температуры воздуха (январь, июль), годовой суммы осадков [Атлас. Автономная..., 2004, с. 28–29], распределение суммарной и поглощенной солнечной радиации (год), радиационного баланса, год (с. 40), суммы осадков по периодам года, температуры воздуха (январь, июль, год), сумм температур за периоды  $>5, 10, 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Климатический атлас Крыма, 2000]. Из этого перечня следует, что карты с комплексными количественными показателями тепло- и влагообеспеченности территории, исключая схемы районирования, в атласах отсутствуют.

Ранее была построена картосхема распределения энергетических затрат на почвообразование для территории Крымского п-ова [Ергина, 2008, с. 75], однако в работе не указано то, по каким метеостанциям и по каким данным это выполнено. Исходные метеоданные, накопленные к 1970–80-м гг. в опубликованных справочниках (по осадкам [Справочник..., 1969, с. 253], по радиационному балансу ( $R$ ,  $\text{ккал}/\text{м}^2\text{ год}^{-1}$ ) [Логвинова, Барабаш, 1982, с. 28] с дополнениями по пунктам без актинометрических наблюдений расчетными значениями по формуле  $R = 0,0156 \sum t >10^{\circ}$ ), позволили по 39 станциям, включая 4 за пределами Крымского п-ова, составить картограмму распределения величины  $Q$  в геоинформационной системе *ArcINFO* при помощи модуля *Spatial Analyst* [Луцевцкий,

<sup>1</sup> WMO Climate Normals. Электронный ресурс: <https://www.ncei.noaa.gov/products/wmo-climate-normals> (дата обращения 10.03.2024)

Ергина, 2010]. В условиях современной изменчивости климата возникает необходимость комплексной оценки тепло- и влагообеспеченности по сопоставимым и актуальным метеоданным.

Цель работы состояла в установлении основных пространственно-временных закономерностей распределения климатических затрат энергии на почвообразование на территории Крымского п-ова с помощью ГИС-технологий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для целей изучения климатической обусловленности эффективности почвообразовательного процесса обоснован комплексный показатель тепло- и влагообеспеченности территории — климатические затраты энергии на почвообразование ( $Q$ , МДж/(м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>), который предложено рассчитывать по годовым данным радиационного баланса и суммы атмосферных осадков [Волобуев, 1974]. В данном исследовании величины  $Q$  оценивали по нормам метеопараметров для 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг. Использовали ряды данных об осадках и температуре воздуха по 11-ти метеостанциям (мет. ст.) полуострова и прилегающих территорий, используя открытый архив<sup>1</sup>. В рядах сумм осадков для метеостанций Евпатория, Ишунь, Клепинино, Ай-Петри и Херсонесский маяк наблюдались пробелы в наблюдениях за период 1991–2005 гг. В таких случаях ряды были восстановлены по ближайшим метеостанциям-аналогам (при коэффициенте корреляции рядов  $>0,7$ ). Также в качестве ретроспективной оценки были задействованы архивные метеоданные, обобщенные с начала XX в. до 1955 г. [Агроклиматический..., 1959], с дополнением до 1960 г.

Картографирование и пространственный анализ выполнены с использованием программного обеспечения *ArcGIS* 10.5. Для получения графо-математических абстракций пространственного распределения оценочного параметра задействован инструментарий модуля *Spatial Analyst* (инструменты *Spline* для интерполяции пространственных данных и *ZonalStatistics* для расчета площадей по зонам анализа). Пакеты пространственного анализа в ГИС предоставляют спектр методов интерполяции данных, среди которых необходимо подобрать подходящий для поставленных задач автоматизированного картографирования с учетом специфики моделируемого процесса [Коновалова и др., 2006]. Для интерполяции точечных данных использовали метод сплайна с натяжением (*Tension Spline*). Этот метод оценивает значения по математическим функциям, которые сводят к минимуму суммарное значение кривизны, что приводит к построению сглаженной поверхности. «Натяжной» сплайн, в отличие от «регуляризованного», обеспечивает уменьшение краевых эффектов при интерполяции, не выходя за пределы диапазона значений исходных данных. Это делает его подходящим для моделирования климатических данных при нерегулярной сетке исходных точек метеостанций на региональном уровне.

Следует отметить, что центральная область Горного Крыма (Главная горно-луговое-лесная гряда) обеспечена рядами климатических данных недостаточно, поэтому эта область обозначена на картах штриховкой. Расчет средневзвешенных значений  $Q$  и оценка площадей их распределения по грациям для Северо-Западного и Предгорного Крыма выполнены с использованием зональной статистики растров интерполированных значений  $Q$ . При картографировании использован единый принцип разбиения граций шкалы  $Q$  по формуле (1) Стерджесса для определения оптимального числа интервалов ( $N$ ):

$$N = 1 + 3.322 \lg n \quad (1),$$

где  $n$  — длина ряда, а при определении шага шкалы учитывали  $N$  и диапазон отображаемых на карте значений.

<sup>1</sup> Погода и климат. Справочно-информационный портал. Электронный ресурс: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения 10.03.2024)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Обоснование информативного показателя оценки тепло- и влагообеспеченности в целях картографирования

Интегральное представление о степени тепло- и влагообеспеченности территории обеспечивают те показатели, которые характеризуют энергетические ресурсы климата и, прежде всего, испаряемость [Поддубский, 2015]. Считается, что в определении испаряемости наиболее обоснован комплексный метод, который учитывает влияние радиационного баланса, температуры и влажности воздуха, однако для практических целей можно использовать упрощенную формулу расчета испаряемости по средней величине радиационного баланса [Будыко, 1971]. Также отметим, что между испаряемостью и суммой температур  $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\sum t >10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) выявляется зависимость, близкая к прямой пропорциональной. Этот тезис важен для целей картографирования (в частности, при использовании интерполяционных процедур), т. к. количество метеостанций, где проводится прямое измерение составляющих радиационного баланса значительно уступает числу пунктов наблюдения за температурой воздуха.

Из-за недостатка натуральных данных по запасам продуктивной влаги для оценки увлажнения широко используют соотношение прихода (суммы атмосферных осадков) и расхода влаги (испаряемость). Это находит свое отражение в структуре таких показателей, как коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова ( $K_u$ ) и радиационный индекс сухости по М. И. Будыко. В других показателях — гидротермическом коэффициенте (ГТК) по Г. Т. Селянинову или коэффициенте влагообеспеченности по Д. И. Шашко испаряемость характеризуется косвенно (через  $\sum t >10\text{ }^{\circ}\text{C}$  или сумму дефицита насыщения). Указанные показатели имеют определенные области применения, что надо учитывать при их использовании. Понятно, что для агроклиматической оценки территории под конкретные сельскохозяйственные культуры необходимы особые показатели оценки условий теплового или вегетационного периода. Этой задаче полностью отвечает формула ГТК, а по методам Н. Н. Иванова и Д. И. Шашко можно оценить условия тепло-влагообеспеченности как за теплый период, так и в целом за год [Поддубский, 2015]. К формуле смешанного типа можно отнести климатический компонент в эмпирической формуле расчета бонитета зональных почв И. И. Карманова [1980, с. 56], где учтена как  $\sum t >10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так и среднегодовые величины коэффициентов увлажнения и континентальности по Иванову.

Проведенное нами обоснование комплексных показателей ориентировано на оценку энергопотенциала климата как одного из факторов почвообразования. В то же время при иной целевой функции могут применять специализированные подходы. Так, для характеристики комфортности и рекреационного потенциала территории Крыма апробированы биоклиматические индексы, основанные на ином круге метеопараметров: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, атмосферное давление [Стефанович, Воскресенская, 2023]. Направленность развития почв во многом определяется водным режимом, где осенне-зимне-весеннее время года, продолжающееся с ноября (октября) по март (апрель) — это период водопоглощения в годичном режиме функционирования почвенного профиля. В зоне распространения черноземных почв по мере усиления внутризональной аридизации происходит уменьшение количества восходящей влаги в свободном виде по профилю почв. Поэтому, определяя в качестве целевой функции оценку климатической обусловленности педогенеза как процесса с иным характерным временем, чем внутривековая динамика метеопараметров, потребовалось обосновать выбор комплексного показателя тепло- и влагообеспеченности территории за весь год.

При изучении климатической детерминированности природной зональности те показатели тепло- и влагообеспеченности, которые используют в своей структуре соотношения характеристик тепла и влаги, фактически рассчитывают удельные величины, как, нап-



пример, в агроклиматических формулах ГТК или коэффициента влагообеспеченности Д. И. Шашко, где определяется то, какая доля осадков приходится на единицу параметров, косвенно характеризующих испаряемость. Удельные величины рассчитываются и в климатическом обосновании границ ландшафтных зон через параметры отношения влаги к теплу (коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова) или обратную величину (радиационный индекс сухости). Аналогичную с коэффициентом увлажнения структуру имеют показатели засушливости, предложенные в 1920–1950-е гг. за рубежом (де Мартона, Гауссена, Бирота) [Práválie, 2013]. Линейность такого «пропорционального» подхода не позволяет адекватно отразить ключевую закономерность почвенно-географической зональности на Восточно-Европейской равнине. Она заключается в том, что северней и южнее от зоны с оптимальным соотношением тепла и влаги и энергопотенциалом (величина  $K_u$  близка к 1) мощность гумусового профиля и интенсивность гумусово-аккумулятивного процесса уменьшаются, что определяется различием доминирующих факторов дифференциации: к северу от избыточно влажной и влажной зоны увлажнения это термический фактор, а к югу (от семиаридной до экстрааридной фации) — фактор увлажнения. В этой связи перспективно применять биоэнергетический подход [Волобуев, 1974], основанный на связи между индексом полноты использования энергии в почвообразовании ( $a$ ) и показателем относительной увлажненности ( $K_n$ ):

$$a = e^{-\frac{1}{K_n \cdot m}} \quad (2),$$

где  $m$  — биологическая активность биогеоценоза.

Из формулы (2) следует, что аналитический вид расчета параметра  $a$  характеризует нелинейную связь параметров, т. е. параметр  $K_n$  при одном и том же значении может понижать или повышать значение  $a$ . Общая величина климатических затрат энергии на почвообразование ( $Q$ ) определяется годовым радиационным балансом деятельной поверхности и суммой атмосферных осадков [Волобуев, 1974]. Проведя корректировку авторской формулы Волобуева (3) в связи с необходимостью использования величин радиационного баланса в международной системе СИ, величины климатических затрат энергии на педогенез  $Q$  (МДж/м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) нами рассчитаны по формуле (4):

$$Q = 41.868 \left[ RB \cdot e^{-\frac{18.8 \cdot RB^{0.73}}{P}} \right], \quad (3),$$

где  $RB$  — радиационный баланс (ккал см<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>),  
 $P$  — годовая сумма осадков, мм;

$$Q = RB \cdot \exp\left(-1.23 \cdot \frac{RB^{0.73}}{P}\right) \quad (4),$$

где  $RB$  — радиационный баланс, МДж/м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>.

Получаемые нами по формуле (4) оценки климатических затрат энергии на почвообразование на данном этапе характеризуют ситуацию для условной горизонтальной поверхности. В связи с этим территориальное распределение энергозатрат на

почвообразование правомерно распространять на плакорные ландшафты, относительная площадь которых по результатам составления ландшафтной карты Крымского п-ова [Атлас. Автономная..., 2004, с. 38–39] составляет 35 % [Позаченюк и др., 2009]. Из-за того, что бóльшая часть полуострова имеет равнинный рельеф со слабыми перепадами высот, для плакорного ландшафтного уровня на 56 % от его площади величины вертикального расчленения рельефа варьируют от 10 до 25 м/км<sup>2</sup> [Табунщик, 2020]. В таких условиях гумусовый профиль автоморфных почв максимально полно отражает климатически обусловленный потенциал педогенеза. Это позволило, в частности, используя большую выборку ( $n = 215$ ) параметров максимальной мощности гумусового горизонта автоморфных почв Восточно-Европейской равнины для отдельных градаций гранулометрического состава, получить зависимость предельной мощности гумусового горизонта от энергетических затрат на почвообразование ( $Q$ , МДж / (м<sup>2</sup> · год)), которая адекватно отражается логистической функцией [Lisetskii, Chepelev, 2014].

Естественно, что на мезо- и микроландшафтных уровнях для разноэкспонированных склонов с различной крутизной необходимы дифференцированные оценки радиационного баланса и определение той доли впитываемой в почву атмосферной влаги, которая участвует в почвообразовании, определяемой понятием «эффективные осадки». Пространственная дифференциация их величин определяется в зависимости от пластики рельефа совокупным влиянием процессов поверхностного, латерального стока и инфильтрации в периоды выпадения жидких осадков и снеготаяния. Расчетные методы оценки изменения влагозапасов за период промачивания почвы включают такие параметры, как экспозиция и крутизна склонов, соотнесенные с условиями плакоров, а также длина и форма склонов [Швебс, 1960].

### **Пространственно-временные особенности распределения климатических затрат энергии на почвообразование**

Обзорная картосхема пространственного распределения энергозатрат на почвообразование, построенная по данным 21 метеостанции Северного Причерноморья и Приазовья для утвержденного ВМО периода для расчета климатических норм (1961–1990 гг.), позволяет увидеть отличительную особенность Крымского п-ова — разнообразие климатических обстановок на площади 27 000 км<sup>2</sup> (рис. 1). Ранее полученная зависимость предельной мощности гумусового горизонта почв от величин  $Q$  [Лисецкий и др., 2017, с. 122] показала, что в максимальном диапазоне почвенно-климатических условий Восточно-Европейской равнины ( $Q$  от 300 до 1 400 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>)) территория Крымского п-ова, несмотря на свою несоизмеримо меньшую площадь, включает в себя значительную часть 850–1 300 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) из указанного диапазона величин  $Q$ . По результатам картографического обобщения архивных метеоданных, накопленных вплоть до 80-х гг. XX в., было определено средневзвешенное значение величины  $Q$  для Крымского п-ова, составившее 1 056 МДж/(м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) [Лисецкий и др., 2017]. При этом важно отметить, что, как отчетливо показано на рис. 1, уменьшение величин  $Q$  (МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>)) по трансзональному градиенту на юге ЕТР (от 1 200 (лесостепь) до 850 (сухая степь)) сменяется в пределах Крымского п-ова на инверсию ландшафтных зон под влиянием Горного Крыма (рис. 1). Это отражается в субширотной смене с севера на юг диапазонов величин  $Q$  от 900–1 000 до 1 300–1 400 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>).

Для комплексного пространственно-временного распределения энергозатрат на почвообразование рассмотрим динамику изменения величин  $Q$ , которая, как показывают данные за 70 лет, различалась по отдельным регионам Крыма (рис. 2). Общий энергопотенциал климата может складываться при разных комбинациях временных изменений показателей тепла и влаги, а также по-разному проявляться в отдельных частях Крыма из-за его окружения морями. В региональной климатической системе нашла отражение смена

меридиональной циркуляционной эпохи (1899–1915 гг.) зональной эпохой (1916–1956 гг.) и с 1957 г. по настоящее время переход на вторую меридиональную эпоху с четырьмя периодами, рубежами которых выступают даты 1970, 1981 и 1998-е гг. [Горбунов, 2022]. Использование статистических процедур анализа временных рядов среднегодовых температур воздуха и сумм осадков (методы линейной регрессии, скользящей средней и аппроксимации) по пяти метеостанциям Крымского п-ова более чем за 100 лет показало, что с 1990-х гг. наблюдается значительный рост температуры воздуха и количества атмосферных осадков [Парубец, 2009]. При этом следует отметить, что использование методов линейной аппроксимации для высокоамплитудных циклических процессов не совсем корректно. Анализ длинного ряда наблюдений по температурам воздуха и сумм осадков по Симферополю (с 1887 г.) показывает, что при их включении для расчета величин  $Q$  и дальнейшей аппроксимации этого ряда полиномом высокой степени обнаруживается внутривековой минимум (на рубеже XIX–XX вв.) и максимум (50–80 гг. XX в. с пиком, приходящимся на 1977–1979 гг.).

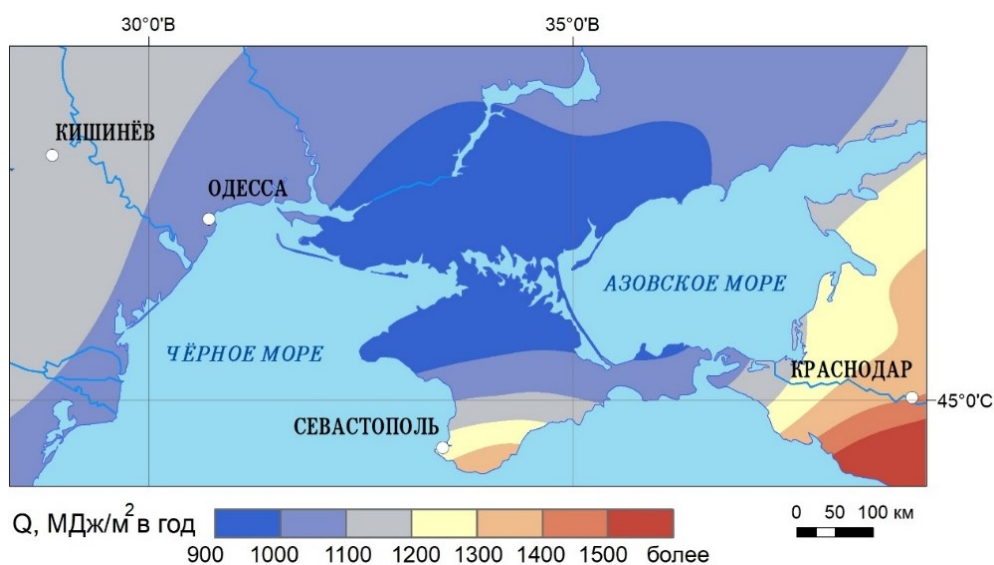


Рис. 1. Климатические затраты энергии на почвообразование ( $Q$ ) на территории Северного Причерноморья и Приазовья (по норме 1961–1990 гг.)

Fig. 1. Climatic energy consumption for soil formation ( $Q$ ) on the territory of the Northern Black Sea Region and the Azov Region (according to the 1961–1990 norm)

Исследования условий тепло- и влагообеспеченности в районе Никитского ботанического сада (Южный берег Крыма (ЮБК)) [Korsakova, 2011] показали, что период 1930–2007 гг. можно охарактеризовать как потепление, сопровождающееся некоторым увеличением количества осадков. Наиболее активное потепление началось в конце 1970-х гг. и продолжается до сих пор [Korsakova, 2011]. Линейный тренд средних температур приземного слоя воздуха, измеренный на агрометеорологической станции «Никитский ботанический сад» в 1930–2010 гг. [Kurbasova et al., 2012] показал, что при средней температуре  $12,5^{\circ}\text{C}$  она в указанный период возрастала со скоростью  $0,06^{\circ}/10$  лет. При переходе к комплексной оценке энергопотенциала климата для почвообразования следует заметить, что в условиях ЮБК в жаркий период (со среднесуточной температурой  $20^{\circ}\text{C}$  и более) выпадает в среднем (по пунктам наблюдений) 28 % годовой суммы осадков, и поэтому эффективные осадки, т. е. потенциально участвующие в педогенезе, составляют 63–79 % от годовых сумм [Lisetskii et al., 2017]. Ранее, с учетом определенной сопряженности пого-



дичной динамики климатических процессов для северных и южных макросклонов Крыма, было проведено моделирование временного ряда изменения величин  $Q$  для периода 1887–2003 гг. применительно к условиям ЮБК [Lisetskii et al., 2017]. В целом за это время наблюдался трендовый рост величин  $Q$  от периода до 1923 г., когда годовичные оценки  $Q$  были менее 1 000 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) (в среднем 889), с нарастанием к 1950–1992 гг., когда величины превышали 1 200 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) (в среднем 1 242). В последующие 12 лет наблюдался дальнейший рост при среднегодовой оценке  $Q$  1293 ± 77 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>).

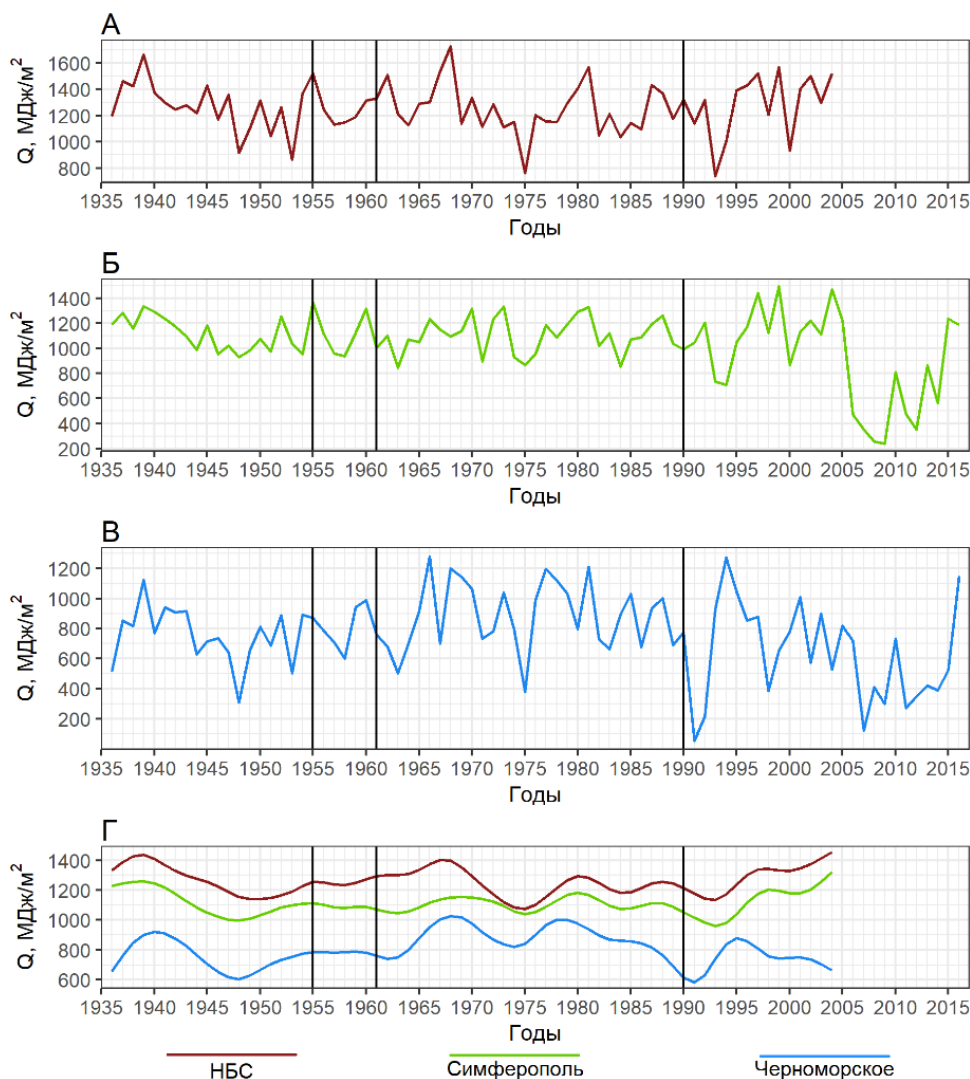


Рис. 2. Динамика изменения величины  $Q$  (МДж/(м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>)) в отдельных регионах Крыма: Предгорном (мет. ст. Симферополь) (Б); Северо-Западном (мтс. Черноморское) (В) и на Южном берегу Крыма (мет. ст. Никитский ботанический сад (НБС)) (А); сглаженные временные ряды (параметр фильтрации 0,5) (Г). Вертикальными линиями показаны временные рубежи: 1955 г. (финальный год ретроспективных метеоданных по [Агроклиматический..., 1959]); 1961–1990 гг. (1-й период климатической нормы)

Fig. 2. Dynamics of changes in the value of  $Q$  (MJ/(m<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>)) in certain regions of Crimea: Foothills (Simferopol Station) (B); North-West (Chernomorskoe Station) (B) and on the southern coast of Crimea (Nikitsky Botanical Garden (NBS) Station) (A); smoothed time series (filtering parameter 0.5) (D). Vertical lines show time boundaries: 1955 (the final year of retrospective meteorological data according to: [Agroclimatic..., 1959]); 1961–1990 (1st period of climate norm)

Оценка варьирования  $Q$  по сглаженным временным рядам показала, что для условий Северо-Западного Крыма (мет. ст. Черноморское) коэффициент вариации в 2 раза и в 1,9 раза больше, чем в условиях Предгорного Крыма (мет. ст. Симферополь) и Южного берега Крыма (мет. ст. Никитский ботанический сад) соответственно. За 70 лет выявляется четыре относительно синхронных по трем метеостанциям периода, когда цикл изменения величины  $Q$  достигает максимума и затем снижается до начальных значений. Длительность таких периодов сокращалась со временем от 11 до 9 лет, при этом снижались и средние величины  $Q$  (МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>)): 1936–1947 гг. (1091); 1965–1974 гг. (930); 1975–1984 гг. (926); 1992–1998 гг. (789). Однако в последние 20 лет климатическая ситуация стала значительно меняться, что будет показано далее. Примечательно, что в прошлые времена по результатам спектрального анализа варвохронологических данных из Сакского озера устойчиво проявлялся период в  $10,7 \pm 0,8$  лет, который определялся как климатический сигнал, обусловленный 10–11-летним солнечным циклом, а в изменениях годовых сумм атмосферных осадков лучше всего проявляется периодичность размерностью 9,3 года [Лисецкий и др., 2013].

Пространственная динамика изменений величин  $Q$ , установленная по 11 базовым метеостанциям для двух 30-летних периодов климатических норм и ретроспективного этапа, представлена на рис. 3. По сравнению с первой половиной XX в. во второй его половине в Крыму наблюдался повсеместный рост величин  $Q$  и изменение его пространственного тренда (рис. 3). Если до 1960 г. средние величины  $Q$  по полуострову составляли 949 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>), то в следующие два тридцатилетия повысились до 1 022 и 1 046 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>), что соответствует приросту +7,7 % и +10,2 %.

Сравнение географии распределения величины  $Q$  по трем временных срезам для Равнинного Крыма (рис. 3) отчетливо отражает значительное сокращение после 1960 г. площадей, которые включали градацию величин  $Q$  от 800 до 900 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>). Примечательно, что период, который предшествовал 1930 г., характеризовался однотипной степенью увлажнения всего Равнинного Крыма и Керченского п-ова — 300–400 мм, за исключением западной оконечности Тарханкутского п-ова (200–300 мм) [Пенюгалов, 1930, карта № 5]. С учетом того, что осадки вносят основной вклад при расчете величины  $Q$ , обращает на себя внимание рост дифференциации величины  $Q$  от 1960 г. до 2020 г., что особенно ярко проявляется в выдвигании полосы изолиний на рис. 3 в диапазоне 1 000–1 100 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) к северу и северо-востоку полуострова.

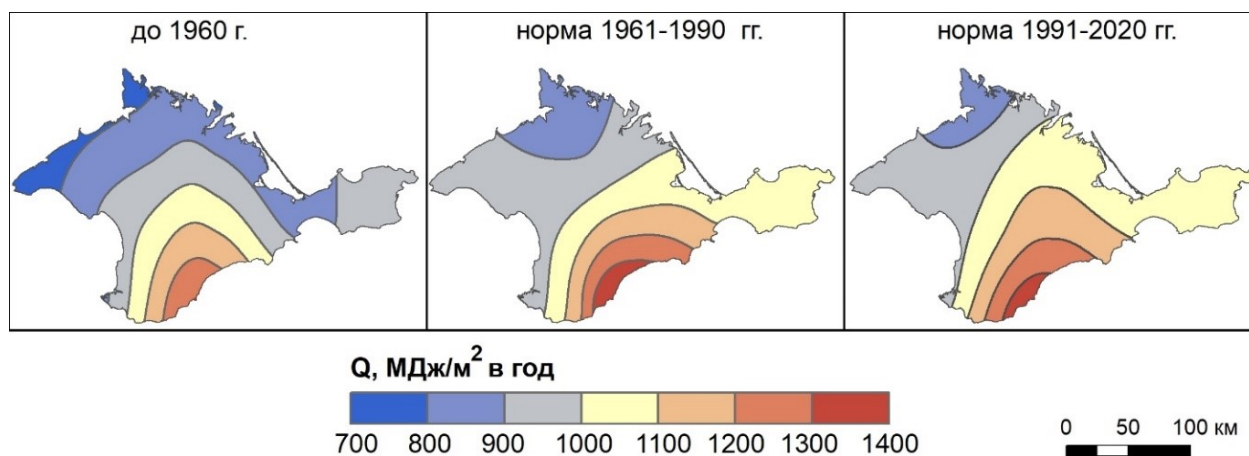
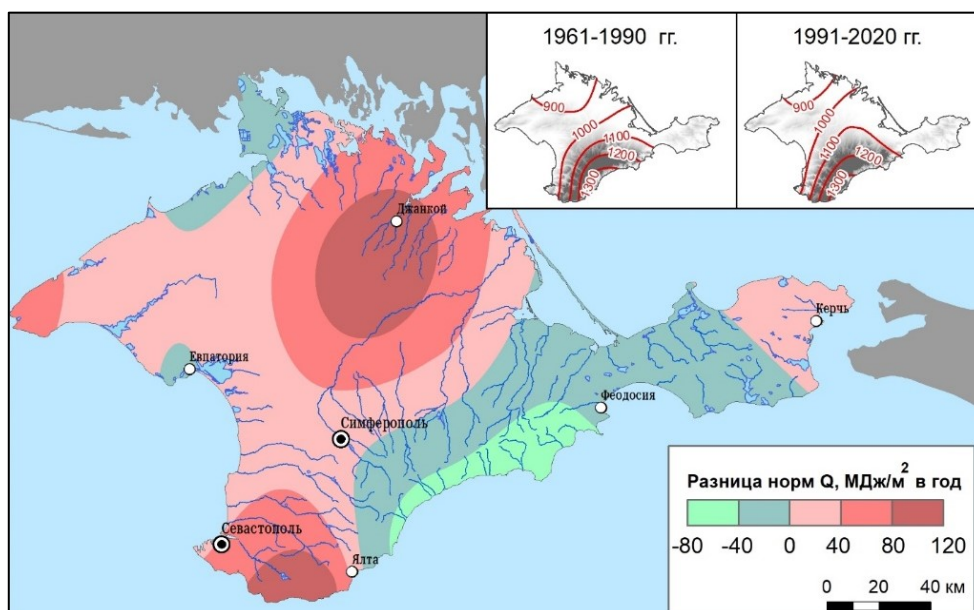


Рис. 3. Картограммы распределения величины  $Q$  Крыма для различных временных интервалов

Fig. 3. Cartograms of the distribution of the  $Q$  value of Crimea for various time intervals

Для территории Крымского п-ова в целом за период 1998–2013 гг. по сравнению с 1983–1997 гг. был характерен значимый рост величин радиационного баланса, а в отношении сумм осадков отмечена тенденция их увеличения [Горбунов, 2022]. Это, согласно формуле Волобуева, отражается в росте величин  $Q$ . Сравнение изменения величин  $Q$  за два 30-летних периода, приведенное на рисунке 4, показывает, что для 1991–2020 гг. величины  $Q$  стали больше на 72 % площади Крымского п-ова, большей частью в Равнинном Крыму. Максимальный рост зафиксирован в Присивашье и в южном секторе полуострова, а именно — между Севастополем и Ялтой. Здесь разница по периодам норм достигла + 112 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>). Снижение величин  $Q$  наблюдается по всему ЮБК к востоку от Ялты и доходит до -62 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>). Самые незначительные изменения были отмечены на Керченском п-ове: здесь вариация нормы  $Q$  не превышала  $\pm 20$  МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>).



*Рис. 4. Пространственная изменчивость  $Q$  по разнице климатических норм (1991–2020 гг. относительно 1961–1990 гг.)*  
*Fig. 4. Spatial variability of  $Q$  by difference in climate norms (1991–2020 relative to 1961–1990)*

В Северо-Западном Крыму наблюдался разнонаправленный тренд роста величин  $Q$  (рис. 5). Темпы прироста в среднем составляли 10 МДж / м<sup>2</sup> на каждые 10 км. В юго-восточном направлении берет начало тренд роста, который проходит через Горный Крым и достигает ЮБК (рис. 6). Скорости роста величин  $Q$  здесь увеличиваются примерно в 4 раза и достигают 40 МДж / м<sup>2</sup> на каждые 10 км.

При сравнении двух регионов Крыма проявляются не только различия пространственного распределения энергопотенциала климата, но и различия его величин, что можно отразить через оценку сопоставимых площадей при использовании зональной статистики растров интерполированных значений  $Q$ . Максимальными величинами  $Q$  в Северо-Западном Крыму 900–975 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) охвачено 87,3 % от общей площади, тогда как в Предгорном Крыму с ЮБК максимальным величинам  $Q$ , начиная с 1 080 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>), соответствует доля площади 89,4 %. Немаловажно и то, что диапазоны  $Q$ , которые соответствуют указанным площадям, различаются в 3,2 раза в пользу предгорной зоны с территорией ЮБК, которые доминирующей площадью охватывают амплитуду энергопотенциала в 240 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>).

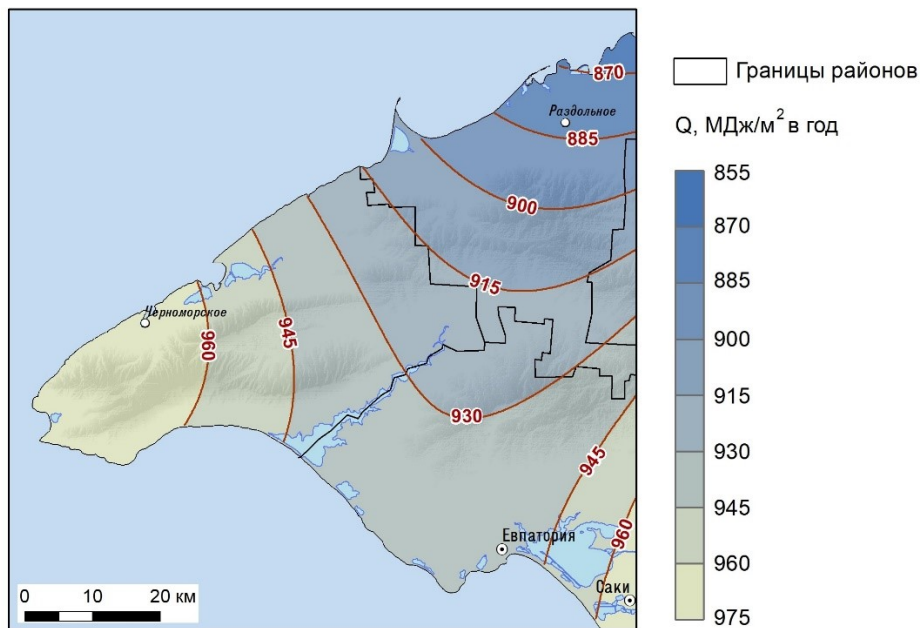


Рис. 5. Энергетический потенциал климата ( $Q$ ) Северо-Западного Крыма для последних десятилетий (по климатической норме 1991–2020 гг.)

Fig. 5. Energy potential of the climate ( $Q$ ) of the North-Western Crimea for the last ten years (according to the climate norm 1991–2020)

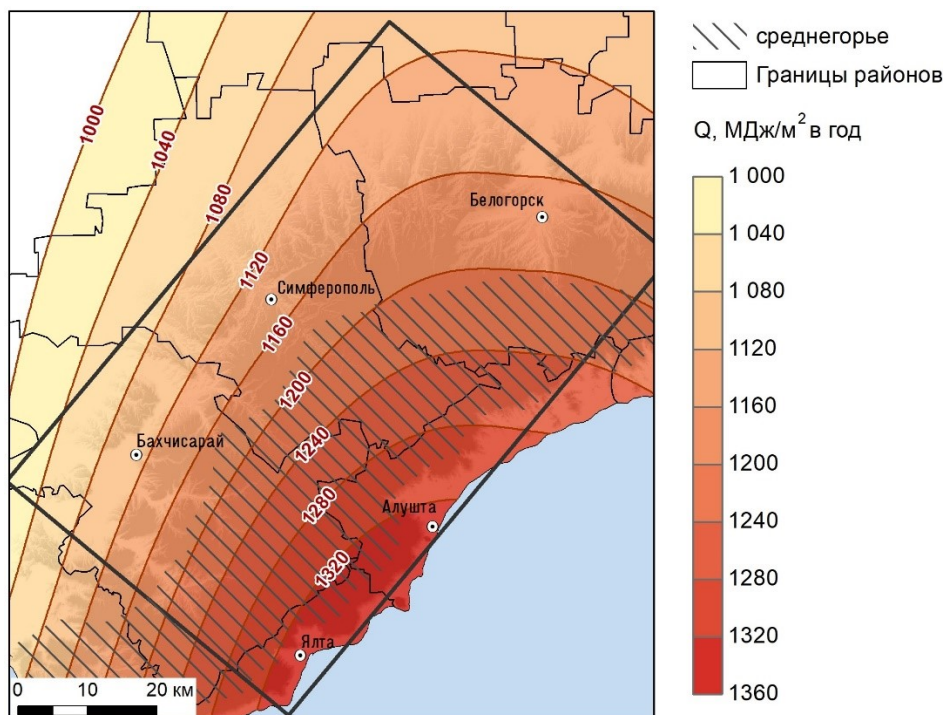


Рис. 6. Энергетический потенциал климата ( $Q$ ) Предгорного Крыма и ЮБК для последних десятилетий (по климатической норме 1991–2020 гг.)

Fig. 6. Climate energy potential ( $Q$ ) of the foothills of Crimea and the South Coast for the last decades (according to the 1991–2020 climate norm)



Полученные результаты пространственно-временного распределения климатических затрат энергии на почвообразование могут быть применимы для оценки эффективности эколого-реставрационных мероприятий при рациональном землепользовании. В процессе трансформации почвенного органического вещества (ОВ) одним из ключевых его этапов является его минерализация (деструкция), интенсивность которой зависит как от состава и свойств ОВ, так и от биоклиматических условий внешней среды и «климата почв» (в основном температуры и влажности почвы) [Каганов, Курганова, 2011]. Проведенное исследование создает информационную основу для всесторонней оценки углерод-депонирующего потенциала залежных почв в рядах автогенных сукцессий почв и растительности в климатическом контексте, что соотносится с ранее поставленной задачей [Баева и др., 2017] необходимости сравнительного анализа изменения содержания органического углерода за последние десятилетия в постагрогенных почвах зонального ряда.

## **ВЫВОДЫ**

Результаты применения ГИС-технологий для установления закономерностей пространственно-временного распределения энергозатрат на почвообразование показали высокую эффективность перехода от дискретных геоданных (метеоданных из нерегулярной сети метеостанций) к континуальным решениям с помощью метода сплайна с натяжением. Климатические затраты энергии на почвообразование на территории Крымского п-ова за два 30-летних периода (1961–1990 гг. и 1991–2020 гг.), установленных Всемирной метеорологической организацией как климатические нормы, увеличились по сравнению с предшествующим этапом (до 1960 г.) на 8 % и 10 % соответственно. Динамика территориального перераспределения величин энергозатрат на почвообразование по трем временным срезам наиболее отчетливо проявляется в значительном сокращении (после 1960 г.) площади с градаций величин 800–900 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) в Равнинном Крыму и выдвигении полосы изолиний в диапазоне 1 000 – 1 100 МДж / (м<sup>2</sup> год<sup>-1</sup>) к северу и северо-востоку полуострова. Результатами картографирования установлены внутрорегиональные территориальные различия распределения величин энергозатрат на почвообразование: при общем их росте за период 1991–2020 гг. на 72 % площади Крыма, главным образом в центре и на юго-востоке полуострова, отмечено и снижение энергозатрат по южному берегу (к востоку от Ялты). Перспективы дальнейших исследований могут быть связаны с переходом от плакорного ландшафтного уровня, для которого получены оценки пространственно-временного распределения энергозатрат на почвообразование в настоящей работе, к низкогорному и среднегорному ландшафтными уровням, что предполагает разработку адаптированных методик учета дифференциации тепла и влаги для мезоформ рельефа и выход на более крупномасштабный уровень ГИС-картографирования.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

This work was funded by the Russian Science Foundation, Project No. 23-17-00169, <https://rscf.ru/en/project/23-17-00169/>.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматический справочник по Крымской области. Ленинград: Гидрометеиздат, 1959. 136 с.
- Атлас. Автономная Республика Крым. Киев–Симферополь, 2004. 80 с.
- Баева Ю. И., Курганова И. Н., Лопес де Гереню О. В., Телеснина В. М.* Сравнительная оценка содержания углерода в постагрогенных почвах различных природно-климатических зон. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2017. Т. 28. № 2. С. 27–39. DOI: 10.21513/0207-2564-2017-2-27-39.
- Будыко М. И.* Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.
- Буряк Ж. А., Крымская О. В., Крымская А. А., Терехин Э. А.* Пространственно-временная изменчивость биоклиматического потенциала Центрального Черноземья. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные Науки, 2024. Т. 166. № 1. С. 126–144. DOI: 10.26907/2542-064X.2024.1.126-144.
- Буряк Ж. А., Терехин Э. А.* Геоинформационное моделирование пространственно-временной изменчивости агроклиматических условий. Региональные геосистемы, 2020. Т. 44. № 3. С. 333–342. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-3-333-342.
- Вальков В. Ф.* Экологическая обусловленность почвенных характеристик климатическими факторами в условиях Северо-Западного Кавказа. Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Естественные науки, 1982. № 3. С. 11–14.
- Волобуев В. Р.* Введение в энергетику почвообразования. М.: Наука, 1974. 126 с.
- Горбунов Р. В.* Функционирование и динамика региональных геоэкосистем в условиях изменения климата (на примере Крымского полуострова). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2022. 191 с.
- Григорьев А. А., Будыко М. И.* Связь балансов тепла и влаги с интенсивностью географических процессов. Доклады АН СССР, 1965. Т. 162. № 1. С. 151–154.
- Ергина Е. И.* Климатическая обусловленность процесса почвообразования в Крыму. Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки, 2008. Т. 13. № 6. С. 73–78.
- Ергина Е. И., Михайлов В. А.* Пространственные закономерности изменения увлажнения агроландшафтов равнинного и предгорного Крыма. Наукові основи землеробства у зв'язку з потеплінням клімату. Миколаїв, 2010. С. 253–255.
- Иванов Н. Н.* Ландшафтно-климатические зоны земного шара. Записки географического общества, 1949. Т. 1. С. 3–224.
- Ивлиева Н. Г., Манухов В. Ф., Шайкунова Р. Б.* Об опыте применения ГИС-технологий для изучения изменений среднегодовой температуры воздуха на территории Европейской части России. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. № 2. С. 121–132. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-121-132.
- Каганов В. В., Курганова И. Н.* Оценка скорости минерализации органического вещества основных типов почв европейской части России при различных температурных режимах. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 2011. № 15(110). С. 145–153.
- Карманов И. И.* Плодородие почв СССР: природные закономерности и количественная оценка. М.: Колос, 1980. 224 с.

- Климатический атлас Крыма. Приложение к научно-практическому дискуссионно-аналитическому сборнику «Вопросы развития Крыма». Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
- Лисецкий Ф. Н., Ергина Е. И.* Развитие почв Крымского полуострова в позднем голоцене. Почвоведение, 2010. № 6. С. 643–657.
- Лисецкий Ф. Н., Маринина О. А., Буряк Ж. А.* Геоархеологические исследования исторических ландшафтов Крыма. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2017. 432 с.
- Лисецкий Ф. Н., Столба В. Ф., Пичура В. И.* Периодичность климатических, гидрологических процессов и озерного осадконакопления на юге Восточно-Европейской равнины. Проблемы региональной экологии, 2013. № 4. С. 19–25.
- Логвинова К. Т., Барабаш М. Б.* Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 320 с.
- Парубец О. В.* Анализ климатических рядов Крымского полуострова. Экосистемы, их оптимизация и охрана, 2009. № 20. С. 154–164.
- Пенюгалов А. В.* Климат Крыма. Опыт климатического районирования. Симферополь: Крымгосиздат, 1930. 178 с.
- Поддубский А. А.* Оценка природной влагообеспеченности Московской области. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство, 2015. № 2. С. 45–50.
- Позаченюк Е. А., Шумский В. М., Лесов А. М.* и др. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 672 с.
- Рыбалко Е. А., Баранова Н. В., Борисова В. Ю.* Закономерности пространственного варьирования индекса Хуглина в условиях Крымского полуострова. Виноградарство и виноделие, 2020. № 1. С. 18–23.
- Рыбалко Е. А., Баранова Н. В., Борисова В. Ю.* Распределение суммы температур выше 20 °С на территории Крымского полуострова. Плодоводство и виноградарство Юга России, 2021. № 3. С. 86–100. DOI: 10.30679/2219-5335-2021-3-69-86-100.
- Селянинов Г. Т.* Методика сельскохозяйственной характеристики климата. Мировой агроклиматический справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1957.
- Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1969. Т. 10. Вып. 4. С. 253.
- Стефанович А. А., Воскресенская Е. Н.* Изменения комплексных биоклиматических показателей в Крыму с середины XX века. Экология человека, 2023. № 1. С. 65–77. DOI: 10.17816/humeco111767.
- Табунчик В. А.* Глубина расчленения рельефа на территории Крымского полуострова. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. № 2. С. 95–105. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-95-105.
- Шашко Д. И.* Агроклиматические ресурсы СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 248 с.
- Швебс А. В.* Влияние экспозиции склона на запасы влаги в почве. Труды Одесского ГМИ, 1960. Вып. 22. С. 49–57.
- Eniolorunda N.* Climate change analysis and adaptation: The role of remote sensing (RS) and geographical information system (GIS). International Journal of Computational Engineering Research, 2014. V. 4. No. 1. P. 41–51.

*Gabriele M., Brumana R., Previtali M., Cazzani A.* A combined GIS and remote sensing approach for monitoring climate change-related land degradation to support landscape preservation and planning tools: The Basilicata case study. *Applied Geomatics*, 2023. V. 15. No. 3. P. 497–532.

*Korsakova S.* Impact of climate change on the grape productivity in the Southern coast of the Crimea. Berlin–Heidelberg, Springer: Challenges and opportunities in agrometeorology, 2011. P. 385–396.

*Kurbasova G. S., Korsakova S. P., Rybalova M. N., Shlikar' G. N.* Spatiotemporal relationships in the structure of the 80-year time series of observations of local surface air temperatures. *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*, 2012. V. 108. No. 1. P. 140–145.

*Lisetskii F., Chepelev O.* Quantitative substantiation of pedogenesis model key components. *Advances in Environmental Biology*, 2014. V. 8. No. 4. P. 996–1000.

*Lisetskii F., Pichura V.* Steppe ecosystem functioning of East-European plain under age-long climatic change influence. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016. V. 9. Iss. 18. P. 1–9. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i18/93780.

*Lisetskii F. N., Stolba V. F., Pichura V. I.* Late-Holocene palaeoenvironments of Southern Crimea: Soils, soil-climate relationship and human impact. *The Holocene*, 2017. V. 27. Iss. 12. P. 1859–1875. DOI: 10.1177/0959683617708448.

*Prāvālie R.* Climate issues on aridity trends of southern Oltenia in the last five decades. *Geographia Technica*, 2013. V. 17. No. 1. P. 70–79.

*Shirokov R. S., Vasiliev A. A.* Using GIS technologies to create a scientific and information geocological base in Western Yamal to identify the effects of climate change. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. V. 579. No. 1. P. 012154.

## REFERENCES

Agroclimatic reference book for the Crimean Region. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1959. 136 p. (in Russian).

Atlas. Autonomous Republic of Crimea. Kyiv-Simferopol, 2004. 80 p. (in Russian\Ukrainian).

*Baeva Yu. I., Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Telesnina V. M.* Comparative assessment of carbon content in postagrogenic soils of various natural climatic zone. *Environmental monitoring and ecosystem modeling*, 2017. V. 28. No. 2. P. 27–39 (in Russian). DOI: 10.21513/0207-2564-2017-2-27-39.

*Budyko M. I.* Climate and life. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 472 p. (in Russian).

*Buryak Zh. A., Krymskaya O. V., Krymskaya A. A., Terekhin E. A.* Spatiotemporal variability of the bioclimatic potential in the Central Chernozem Region. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya: Estestvennye Nauki (Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)*, 2024. V. 166. No. 1. P. 126–144 (in Russian). DOI: 10.26907/2542-064X.2024.1.126-144.

*Buryak Zh. A., Terekhin E. A.* Geoinformation modeling of spatio-temporal variability of agroclimatic conditions. *Regional Geosystems*, 2020. V. 44. No. 3. P. 333–342 (in Russian). DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-3-333-342.

Climatic atlas of Crimea. Appendix to the scientific-practical discussion and analytical collection “Issues of Crimea’s Development”. Simferopol: Tavria-Plus, 2000. 120 p. (in Russian).

*Eniolorunda N.* Climate change analysis and adaptation: The role of remote sensing (RS) and geographical information system (GIS). *International Journal of Computational Engineering Research*, 2014. V. 4. No. 1. P. 41–51.

- Ergina E. I.* Climatic conditionality of the soil formation process in Crimea. *Bulletin of Odessa National University. Geographical and Geological Sciences*, 2008. V. 13. No. 6. P. 73–78 (in Russian).
- Ergina E. I., Mykhaylov V. A.* Spatial regularities of changes in the agrolandscapes of lowland and foothill Crimea. *Scientific foundations of agriculture in connection with climate warming*. Mykolayv, 2010. P. 253–255 (in Russian).
- Gabriele M., Brumana R., Previtali M., Cazzani A.* A combined GIS and remote sensing approach for monitoring climate change-related land degradation to support landscape preservation and planning tools: The Basilicata case study. *Applied Geomatics*, 2023. V. 15. No. 3. P. 497–532.
- Gorbunov R. V.* Functioning and dynamics of regional geoecosystems under conditions of climate change (using the example of the Crimean Peninsula). Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2022. 191 p. (in Russian).
- Grigoriev A. A., Budyko M. I.* Relationship between heat and moisture balances and the intensity of geographic processes. *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1965. V. 162. No. 1. P. 151–154 (in Russian).
- Handbook on the climate of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. V. 10. Iss. 4. P. 253. (in Russian).
- Ivanov N. N.* Landscape and climatic zones of the globe. *Notes of geographical societies*, 1949. V. 1. P. 3–224 (in Russian).
- Ivlieva N. G., Manukhov V. F., Shaykunova R. B.* About the experience of GIS technologies application for the study of changes of the mean annual air temperature on the territory of the European part of Russia. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. No. 2. P. 121–132 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-121-132.
- Kaganov V. V., Kurganova I. N.* Evaluation of organic matter mineralization rate in main soil types of Russian European Part under different temperature regimes. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Series: Natural sciences*, 2011. No. 15(110). P. 145–153 (in Russian).
- Karmanov I. I.* Soil fertility of the USSR: Natural patterns and quantitative assessment. Moscow: Kolos, 1980. 224 p. (in Russian).
- Korsakova S.* Impact of climate change on the grape productivity in the Southern coast of the Crimea. Berlin–Heidelberg, Springer: Challenges and opportunities in agrometeorology, 2011. P. 385–396.
- Kurbasova G. S., Korsakova S. P., Rybalova M. N., Shlikar' G. N.* Spatiotemporal relationships in the structure of the 80-year time series of observations of local surface air temperatures. *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*, 2012. V. 108. No. 1. P. 140–145.
- Lisetskii F., Chepelev O.* Quantitative substantiation of pedogenesis model key components. *Advances in Environmental Biology*, 2014. V. 8. No. 4. P. 996–1000.
- Lisetskii F. N., Ergina E. I.* Soil development on the Crimean Peninsula in the Late Holocene. *Eurasian Soil Science*, 2010. V. 43. No. 6. P. 601–613. DOI: 10.1134/S1064229310060013.
- Lisetskii F. N., Marinina O. A., Buryak Zh. A.* A geoarchaeological survey of the historical landscapes of Crimea. Voronezh: VSU Publishing House, 2017. 432 p. (in Russian).
- Lisetskii F., Pichura V.* Steppe ecosystem functioning of East-European plain under age-long climatic change influence. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016. V. 9. Iss. 18. P. 1–9. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i18/93780.
- Lisetskii F. N., Stolba V. F., Pichura V. I.* Periodicity of climatic, hydrological and lacustrine sedimentation processes in the south of the East-European Plain. *Regional Environmental Issues*, 2013. No. 4. P. 19–25 (in Russian).

- Lisetskii F. N., Stolba V. F., Pichura V. I.* Late-Holocene palaeoenvironments of Southern Crimea: Soils, soil-climate relationship and human impact. *The Holocene*, 2017. V. 27. Iss. 12. P. 1859–1875. DOI: 10.1177/0959683617708448.
- Logvynova K. T., Barabash M. B.* Climate and dangerous hydrometeorological phenomena of Crimea. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 320 p. (in Russian).
- Parubets O. V.* Analysis of climatic series of the Crimean Peninsula. Ecosystems, their optimization and protection, 2009. No. 20. P. 154–164 (in Russian).
- Penyugalov A. V.* Climate of Crimea. Experience of climatic zoning. Simferopol: Krymgosizdat, 1930. 178 p. (in Russian).
- Poddubsky A. A.* Assessment of the natural moisture supply of the Moscow Region. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*, 2015. No. 2. P. 45–50 (in Russian).
- Pozachenyuk E. A., Shumsky V. M., Lesov A. M.* et al. Contemporary landscapes of Crimea and neighboring waters. Simferopol: Biznes-inform, 2009. 672 p. (in Russian).
- Prǎvǎlie R.* Climate issues on aridity trends of southern Oltenia in the last five decades. *Geographia Technica*, 2013. V. 17. No. 1. P. 70–79.
- Rybalko E. A., Baranova N. V., Borisova V. Yu.* Regularities of the spatial variation of the Huglin index in the conditions of the Crimean Peninsula. *Winemaking and viticulture*, 2020. No. 1. P. 18–23 (in Russian).
- Rybalko E. A., Baranova N. V., Borisova V. Yu.* Distribution of the sum of temperatures above 20 °C on the territory of the Crimean Peninsula. *Fruit growing and viticulture of South Russia*, 2021. No. 3. P. 86–100 (in Russian). DOI: 10.30679/2219-5335-2021-3-69-86-100.
- Selyaninov G. T.* The methodology of rural climate characteristics. *World agroclimatic reference book*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957 (in Russian).
- Shashko D. I.* Agroclimatic resources of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 248 p. (in Russian).
- Shirokov R. S., Vasiliev A. A.* Using GIS technologies to create a scientific and information geocological base in Western Yamal to identify the effects of climate change. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. V. 579. No. 1. P. 012154.
- Shvebs A. V.* Influence of slope exposure on moisture reserves in the soil. *Proceedings of the Odessa HMI*, 1960. Iss. 22. P. 49–57 (in Russian).
- Stefanovich A. A., Voskresenskaya E. N.* Changes in complex bioclimatic indicators in Crimea since the middle of the 20th century. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*, 2023. No. 1. P. 65–77 (in Russian). DOI: 10.17816/humeco111767.
- Tabunshchik V. A.* Depth of the relief dissection on the territory of the Crimean Peninsula. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26. No. 2. P. 95–105 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-95-105.
- Valkov V. F.* Ecological dependence of soil characteristics on climatic factors in the conditions of the North-West Caucasus. *Izvestiya of North Caucasus Scientific Center of Higher Education. Natural Sciences*, 1982. No. 3. P. 11–14 (in Russian).
- Volobuev V. R.* Introduction to the energetics of soil formation. Moscow: Nauka, 1974, 126 p. (in Russian).