

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 536.423.1:528.8

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-2-106-126

Оценка эвапотранспирации по модели РТ-JPL с данными реанализа ERA5-Land

Алексей Вячеславович Доброхотов¹, Людмила Владимировна Козырева²,
Дарья Павловна Мухина³

^{1, 2, 3}Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург,
Российская Федерация

¹adobrokhotov@agrophys.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9368-6229>

²4ludak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7990-8211>

³darin.m.19.13.21@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-1654-7000>

Аннотация. Цель: оценка возможности интеграции данных радиационных потоков из климатического реанализа ERA5-Land в энергобалансовую модель, устанавливающую пространственное распределение эвапотранспирации в условиях отсутствия тепловизионных спутниковых данных, и валидация модифицированной модели на примере орошаемого поля сои в Саратовской области. **Материалы и методы.** В качестве энергобалансовой модели использована РТ-JPL. Предложена схема замены расчетного блока радиационного баланса данными реанализа ERA5-Land с предварительной корректировкой систематического смещения по данным натурных измерений. Валидация метода проводилась путем сравнения с натурными измерениями эвапотранспирации на пульсационных станциях. **Результаты.** Сравнительный анализ показал, что исходные данные реанализа ERA5-Land систематически занижают значения радиационного баланса по сравнению с расчетным методом РТ-JPL (коэффициент детерминации $R^2 = 0,59$, процентное смещение PBias = 11,3 % против $R^2 = 0,73$ и PBias = 2,5 %). Введение корректирующего коэффициента (~1,11) позволило повысить качество входных данных реанализа: R^2 увеличился до 0,69, а PBias снизился до 1,3 %. Последующее моделирование эвапотранспирации с использованием скорректированного радиационного баланса из ERA5-Land продемонстрировало практически полную идентичность оригинальной методике РТ-JPL ($R^2 = 0,47$, квадратный корень из среднеквадратичной ошибки RMSE = 0,12 мм/ч, PBias = -0,4 %). Апробация на орошаемом поле сои в Саратовской области показала, что абсолютные расхождения между методами в оценке эвапотранспирации не превышают 0,03 мм/ч. **Выводы.** Предложенная модификация модели РТ-JPL позволяет получать адекватные оценки пространственного распределения компонентов эвапотранспирации при использовании данных реанализа ERA5-Land взамен расчетного блока, требующего наличия теплового канала. Это расширяет возможность применения модели в сочетании с данными спутников или БПЛА, не оснащенных тепловыми сенсорами.

Ключевые слова: радиационный баланс, транспирация, испарение с поверхности почвы, метод турбулентных пульсаций, дистанционное зондирование Земли, Landsat, коррекция систематического смещения

Источник финансирования: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-00087.

Для цитирования: Доброхотов А. В., Козырева Л. В., Мухина Д. П. Оценка эвапотранспирации по модели РТ-JPL с данными реанализа ERA5-Land // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 2. С. 106–126. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-106-126>.



LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Evapotranspiration assessment using the PT-JPL model with ERA5-Land reanalysis data

Aleksei V. Dobrokhotov¹, Ludmila V. Kozyreva², Daria P. Mukhina³

^{1, 2, 3}Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

¹adobrokhotov@agrophys.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9368-6229>

²4ludak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7990-8211>

³darin.m.19.13.21@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-1654-7000>

Abstract. Purpose: to assess the feasibility of integrating radiation flow data from the ERA5-Land climate reanalysis into an energy balance model that determines the spatial distribution of evapotranspiration in the absence of satellite thermal imaging data and to validate the modified model using an irrigated soybean field in the Saratov region as an example. **Materials and methods.** PT-JPL was used as an energy balance model. A scheme for replacing the radiation balance calculation block with ERA5-Land reanalysis data with a preliminary correction for systematic bias based on in-situ measurements is proposed. The method was validated by comparing it with in-situ evapotranspiration measurements at pulse stations. **Results.** A comparative analysis showed that the initial ERA5-Land reanalysis data systematically underestimated the radiation balance values compared to the PT-JPL calculation method (determination coefficient $R^2 = 0.59$, percentage bias PBias = 11.3 % versus $R^2 = 0.73$ and PBias = 2.5 %). The introduction of a correction coefficient (~1.11) improved the quality of the input reanalysis data: R^2 increased to 0.69, and PBias decreased to 1.3 %. Subsequent evapotranspiration modeling using the updated radiation balance from ERA5-Land demonstrated almost complete identity with the original PT-JPL method ($R^2 = 0.47$, RMSE = 0.12 mm/h, PBias = -0.4 %). Testing on an irrigated soybean field in the Saratov region showed that the absolute differences between the methods in estimating evapotranspiration do not exceed 0.03 mm/h. **Conclusions.** The proposed modification of the PT-JPL model allows for obtaining adequate estimates of the spatial distribution of evapotranspiration components using ERA5-Land reanalysis data instead of the calculation block requiring a thermal channel. This expands the applicability of the model in combination with data from satellites or UAVs not equipped with thermal sensors.

Keywords: radiation balance, transpiration, evaporation from the soil surface, turbulent pulsation method, Earth remote sensing, Landsat, bias correction

Funding source: this study was supported by grant No. 24-77-00087 from the Russian Science Foundation.

For citation: Dobrokhotov A. V., Kozyreva L. V., Mukhina D. P. Evapotranspiration assessment using the PT-JPL model with ERA5-Land reanalysis data. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(2):106–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-106-126>.

Введение. Мониторинг эвапотранспирации (ET) критически важен для рационального управления водными ресурсами, оценки продуктивности агроценозов, прогнозирования и смягчения последствий засух, а также для изучения взаимодействий между атмосферой, гидросферой и биосферой [1].

ET может быть измерена на сельскохозяйственном поле методом турбулентных пульсаций или с помощью лизиметров, однако такое оборудование крайне дорогостоящее и зачастую является деструктивным. В связи с высокой трудоемкостью прямых измерений, в практике мелиорации и орошаемого земледелия широкое распространение получили расчетные методы определения водопотребления на основе метеорологических параметров, включая подходы с использованием биоклиматических коэффициентов и уравнений тепло- и влагопереноса [2–5]. Также для определения водопотребления перспективным направлением является применение методов машинного обучения, которые способны эффективно аппроксимировать сложные нелинейные зависимости в водохозяйственных системах при ограниченном наборе надежных данных [6].

Традиционным расчетным методом для оценки *ET* является метод FAO-56, основанный на модифицированном уравнении Пенмана – Монтейса [7]. Однако его применение ограничено необходимостью сбора почвенных и фенологических данных, которые сложно получить в масштабе внутриполевой неоднородности. Помимо метода FAO-56, в агрометеорологической практике развиваются подходы, основанные на решении уравнения энергетического баланса поверхности с учетом аэродинамических характеристик растительного покрова [3, 4]. Однако такие методы требуют специальных энергобалансовых измерений на сельскохозяйственном поле. Эти ограничения стимулировали развитие альтернативных подходов, в первую очередь – разработку моделей, основанных на данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Современные спутниковые методы, основанные на энергобалансовых моделях, таких как SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land – алгоритм поверхностного энергетического баланса для суши), METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration – компьютерная модель, разработанная Университетом Айдахо для расчета

эвапотранспирации как остаточного компонента поверхностного энергетического баланса), SSEBor (Operational Simplified Surface Energy Balance – упрощенная модель баланса энергии поверхности, разработанная для оценки фактической эвапотранспирации), TSEB (Two-Source Energy Balance – двухуровневая энергобалансовая модель), PT-JPL (Priestley-Taylor Jet Propulsion Laboratory – упрощенная энергобалансовая модель, предназначенная для оценки скрытого потока тепла при испарении влаги с поверхности почвы, транспирации и перехвата влаги листьями), стали стандартными инструментами для получения пространственно распределенных оценок потоков *ET*. Такие энергобалансовые модели опираются на метеорологические данные, вегетационные индексы и температуру поверхности. В этом контексте глобальные климатические реанализы, такие как CFS (Climate Forecasting System – система прогнозирования климата), MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 – глобальный климатический реанализ, разработанный Управлением глобального моделирования и ассимиляции NASA), ERA5-Land (набор данных реанализа, созданный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды), становятся потенциальным источником метеорологических данных для инициализации моделей. Они предоставляют полный набор необходимых метеопараметров в любой точке земного шара. Данные реанализа также позволяют разрабатывать гибридные схемы, где исходные расчеты радиационных потоков в моделях ДЗЗ заменяются готовыми полями реанализа. Такой подход активно исследуется. Например, реанализ ERA5-Land успешно интегрировался в качестве источника метео данных для моделей SSEBor, ERA5 и MERRA-2 – в модели SEBAL и METRIC [8–10]. Попытка интеграции реанализа MERRA-2 непосредственно для замены радиационного баланса (R_n) в модели PT-JPL была предпринята в работе Z. Xie и др. [11], в которой для оценок *ET* были получены высокие метрики каче-

ства ($KGE = 0,70$, $R^2 = 0,55$) при валидации по сети пульсационных станций в различных экосистемах Америки.

Важно отметить, что ключевым узким местом современных моделей на основе данных ДЗЗ остается зависимость от тепловых инфракрасных снимков для оценки температуры поверхности, которая используется для расчета R_n и определения водного стресса растений. При этом пространственное разрешение температурных продуктов ДЗЗ часто недостаточно для корректного захвата температурных контрастов, особенно в условиях водного стресса [12]. В этом отношении модель RT-JPL обладает преимуществом: тепловой канал используется в ней только для расчета R_n . Следовательно, замена этого расчетного блока готовыми данными R_n из реанализа потенциально позволит полностью отказаться от тепловизионных данных, расширив область применения модели включением спутниковых платформ, не оснащенных тепловыми сенсорами (например, Sentinel-2). Несмотря на растущее число работ по интеграции реанализов в спутниковые модели, остается недостаточно изученным вопрос о точности радиационных потоков из реанализов в контексте агроэкосистем. Также отсутствует сравнение итоговых значений ET при переходе от традиционных расчетных алгоритмов оценки радиационных потоков в моделях ДЗЗ к данным реанализа.

В связи с этим, целью настоящего исследования являлось изучение возможности интеграции данных радиационных потоков из климатического реанализа ERA5-Land в энергобалансовую модель, устанавливающую пространственное распределение эвапотранспирации в условиях отсутствия тепловизионных спутниковых данных, и валидация модифицированной модели на примере орошаемого поля сои в Саратовской области.

В качестве данных климатического реанализа был выбран ERA5-Land, предоставляющий необходимые данные для инициализации RT-JPL. В качестве данных ДЗЗ использовались снимки Landsat, которые имеют опти-

ческие и тепловые каналы, обладают средним пространственным разрешением и традиционно применяются в качестве входных данных для энергобалансовых моделей.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1) формирование набора данных прямых измерений R_n и ET на сельскохозяйственных полях, а также сопутствующих снимков Landsat и данных ERA5-Land;

2) сравнительный анализ точности оценки R_n по расчетной методике (на основе данных о температуре поверхности из Landsat) и по данным радиационных потоков из ERA5-Land;

3) анализ качества моделирования ET при оценке R_n различными методами.

Материалы и методы. Для оценки ET была применена модель РТ-JPL [13]. Эта энергобалансовая модель, основанная на данных ДЗЗ и метеорологических наблюдениях, оценивает ET по модифицированному уравнению Пристли – Тейлора. В основе подхода лежит расчет потенциального потока ET , который затем снижается с помощью набора биофизических ограничений, учитывающих состояние растительности и почвы. Модель РТ-JPL разделяет общий поток ET на три составляющие: транспирацию растений (ET_c), испарение с поверхности почвы (ET_s) и испарение влаги, перехваченной листовой поверхностью (ET_i).

В энергобалансовых моделях, использующих данные ДЗЗ, общий R_n обычно рассчитывается как сумма его составляющих на момент съемки с учетом координат, состояния атмосферы и температуры поверхности [14]:

$$R_n = (1 - \alpha) \times R_{sd} + R_{ld} - R_{lu} - (1 - \varepsilon_s) \times R_{ld}, \quad (1)$$

$$R_{sd} = G_{sc} \times \cos(\theta_z) \times \tau_{sw} / d^2, \quad (2)$$

$$R_{ld} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4, \quad (3)$$

$$R_{lu} = \varepsilon_s \times \sigma \times T_r^4, \quad (4)$$

где α – альbedo поверхности, доли от 1;

R_{sd} – приходящая коротковолновая радиация, Вт/м²;

R_{ld} – приходящая длинноволновая радиация, Вт/м²;

R_{lu} – уходящая длинноволновая радиация, Вт/м²;

ε_s – излучательная способность поверхности;

G_{sc} – солнечная постоянная (1367 Вт/м²);

θ_z – зенитный угол Солнца;

τ_{sw} – коэффициент прозрачности атмосферы для коротковолновой радиации;

d^2 – квадрат относительного расстояния между Солнцем и Землей;

ε_a – излучательная способность атмосферы;

σ – постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м² · К⁴);

T_a – температура воздуха в приземном слое, К;

T_r – радиационная температура поверхности, К.

Для инициализации модели RT-JPL были использованы данные климатического реанализа ERA5-Land [15]. Модель требует следующих метеорологических величин: температура и относительная влажность воздуха, скорость ветра и атмосферное давление. Помимо этих данных, ERA5-Land предоставляет также оценки составляющих R_n , в частности R_{sd} , R_{ld} , R_{lu} . Это позволяет рассчитать R_n (уравнение (1)) непосредственно на основе данных ERA5-Land и оценки альbedo поверхности (α), таким образом заменить соответствующий расчетный блок в исходной модели RT-JPL (уравнения (2)–(4)).

В качестве источника данных ДЗЗ использовались снимки спутниковых систем Landsat 7–9. Работа проводилась со снимками второго уровня предобработки (Level 2), которые прошли радиометрическую и атмосферную коррекцию. Для расчетов отбирались сцены, удовлетворяющие следующим критериям:

1) отсутствие облачности и тени от облачности над исследуемыми сельскохозяйственными полями (на основе декодирования канала QA_PIXEL);

2) погрешность определения температуры по тепловому каналу не превышает 5 К (на основе декодирования канала оценки качества ST_QA).

Сцены, не соответствующие этим требованиям, были исключены из набора данных. Для сопоставимости с наземными измерениями потоков снимки Landsat с исходным разрешением 30 м были приведены к пространственному разрешению 100 м методом передискретизации по принципу пирамиды изображений с интерполяцией методом ближайшего соседа. Данное разрешение соответствует типичной зоне охвата (footprint) потоков ET на пульсационных станциях, размещаемых на сельскохозяйственных полях [16].

Для валидации моделирования R_n и ET на основе модели PT-JPL и данных ERA5-Land был собран набор прямых наземных измерений потоков. Данные по R_n были получены с помощью балансомеров, а данные по ET – методом турбулентных пульсаций. Измерения были собраны из открытых источников и получены по запросу из международных сетей (FLUXNET, AmeriFlux, EFDC, ICOS и AsiaFlux). Итоговый набор данных включает информацию со 103 станций, расположенных на сельскохозяйственных полях. Для сопоставления с модельными расчетами были использованы 8245 спутниковых снимков в период проведения измерений.

Для анализа ограничений модифицированной версии модели PT-JPL при оценке пространственного распределения ET в качестве тестового объекта было выбрано орошаемое поле сои сорта Соер-7 площадью 44,4 га. Данный объект представляет собой типичный пример орошаемого агроценоза, где ожидается выраженная пространственная неоднородность влагообмена. Поле расположено в пос. Степное (Саратовская область) на опытном полигоне Саратовского государственного аграрного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова (координаты

центра поля: 51,1259124° с. ш., 46,0006069° в. д.). Полив осуществлялся дождевальными машинами кругового действия (ДМ-КД) марки «Каскад». Для моделирования ET был выбран спутник Landsat 8. Выбор дискретизации 30 м (Landsat 8) обоснован конструкцией дождевальной машины (длина секций 48–59,5 м, что превышает размер пикселя), а также наличием тепловых каналов, необходимых для расчета ET . Для орошения посева сои было проведено девять поливов: 1) 19–21 июня (13 мм); 2) 26–28 июня (16 мм); 3) 30 июня – 2 июля (16 мм); 4) 7–10 июля (18 мм); 5) 15–18 июля (18 мм); 6) 22–25 июля (18 мм); 7) 29–31 июля (18 мм); 8) 4–7 августа (16 мм); 9) 20–22 августа (13 мм).

Результаты и обсуждения. Сравнение оценок R_n , полученных по стандартной расчетной методике (уравнения (1)–(4)) и из реанализа ERA5-Land, с данными измерений показало, что расчетная методика в целом превосходит ERA5-Land по большинству метрик (таблица 1). В частности, она демонстрирует более высокий коэффициент детерминации (R^2) и меньший квадратный корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE). При этом данные ERA5-Land характеризуются систематическим смещением, которое говорит об устойчивом занижении значений (рисунок 1b). Расчетная методика в свою очередь показывает близкое к нулю процентное смещение (PBias) (таблица 1), но при этом завышает низкие и занижает высокие значения (рисунок 1a).

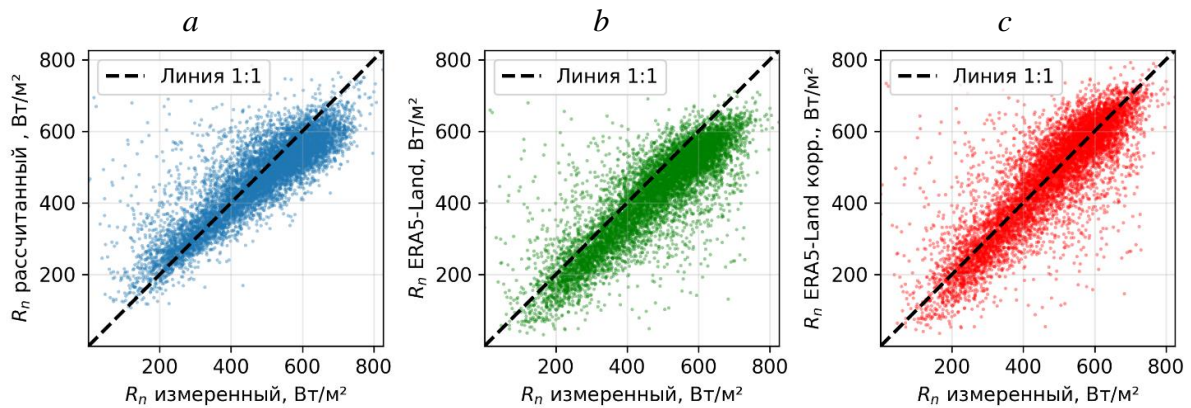
Таблица 1 – Метрики эффективности моделирования радиационного баланса R_n

В Вт/м²

Table 1 – Metrics for the effectiveness of R_n radiation balance modeling

In W/m²

Метод оценки R_n	Метрика			
	R^2	RMSE	PBias, %	КGE
Расчетный	0,73	75,9	+2,5	0,76
ERA5-Land (исходный)	0,59	93,7	+11,3	0,80
ERA5-Land (коррекция смещения)	0,69	80,7	+1,3	0,85



a – диаграмма рассеяния для стандартной расчетной методики PT-JPL; *b* – диаграмма рассеяния для данных реанализа ERA5-Land; *c* – диаграмма рассеяния для данных ERA5-Land после коррекции систематического смещения
a – scatter graph for the standard PT-JPL calculation method; *b* – scatter graph for ERA5-Land reanalysis data; *c* – scatter graph for ERA5-Land data after bias correction

Рисунок 1 – Сравнение измеренных и модельных значений радиационного баланса (R_n)

Figure 1 – Comparison of measured and modeled radiation balance (R_n) values

Для устранения систематического смещения в данных ERA5-Land была применена мультипликативная коррекция для сохранения физической интерпретируемости. Для проверки устойчивости коррекции массив измерений был разделен поровну по станциям на обучающую и тестовую выборки. Значения R^2 для скорректированных данных на обеих выборках оказались близки (0,70 и 0,68 соответственно). Итоговое уравнение коррекции R_n для данных ERA5-Land в условиях агроэкосистем имеет вид:

$$R_n (\text{ERA5-Land}_{\text{корр}}) = 1,1129295863 \times R_n (\text{ERA5-Land}). \quad (5)$$

После коррекции смещения качество данных ERA5-Land стало сопоставимым с расчетной методикой (таблица 1). На диаграмме рассеяния (рисунок 1*c*) точки располагаются существенно ближе к линии 1:1, хотя тенденция к занижению в области низких значений R_n сохраняется.

Сравнение результатов моделирования ET на основе различных входных данных R_n показало следующее: коррекция систематического смещения в данных ERA5-Land позволила устранить положительное смещение ET ($P\text{Bias} = 8,9 \%$), снизив его до уровня, сопоставимого с расчет-

ным методом (таблица 2). При этом ключевые метрики качества (R^2 , RMSE, KGE) для всех трех вариантов оказались близки. Анализ диаграмм рассеяния (рисунок 2) позволяет сделать вывод, что, как и в случае оценки R_n , для расчетного метода наблюдается переоценка ET в области низких значений.

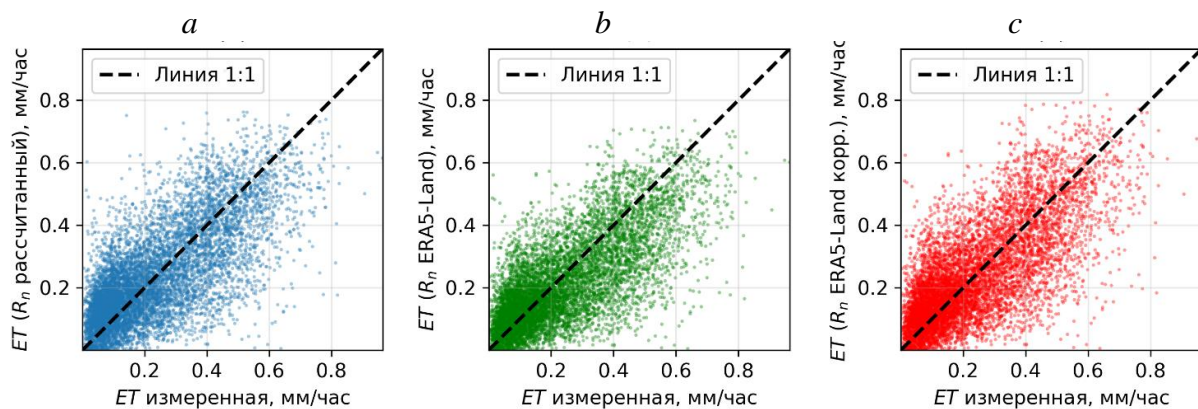
**Таблица 2 – Метрики эффективности моделирования
 эвапотранспирации (ET)**

В мм/ч

Table 2 – Evapotranspiration (ET) modeling performance metrics

In mm/h

Метод оценки R_n	Метрика			
	R^2	RMSE	PBias, %	KGE
Расчетный	0,47	0,12	-0,6	0,69
ERA5-Land (исходный)	0,48	0,12	+8,9	0,67
ERA5-Land (коррекция смещения)	0,47	0,12	-0,4	0,71



a – стандартная расчетная методика; *b* – исходные данные ERA5-Land;
c – скорректированные данные ERA5-Land

a – standard calculation method; *b* – original ERA5-Land data; *c* – updated ERA5-Land data

**Рисунок 2 – Сравнение измеренных и модельных значений
 эвапотранспирации (ET) для модели PT-JPL с использованием
 разных источников радиационного баланса (R_n)**

**Figure 2 – Comparison of measured and modeled evapotranspiration (ET)
 values for the PT-JPL model using different sources of radiation balance (R_n)**

Таким образом, скорректированные данные R_n из реанализа ERA5-Land могут заменить стандартный расчетный блок оценки радиационных потоков в модели PT-JPL. Это решение сохраняет точность моделирования, сопоставимую с оригинальной методикой, и при этом позволяет использовать глобальные, готовые к применению данные реанализа, что су-

щественно расширяет потенциальную область применения модели для целей непрерывного мониторинга агроэкосистем.

Результаты моделирования для орошаемого поля сои в пос. Степное через 3 дня после полива для даты 28.07.2021 (спутник Landsat-8, время пролета 11:53, пространственное разрешение 30×30 м) (рисунок 3), соответствующий периоду активной вегетации, позволили сделать следующие выводы:

1) на основной орошаемой площади поля суммарный поток ET формируется преимущественно за счет транспирации растений (ET_c). Вклад испарения с поверхности почвы (ET_s) здесь минимален, что соответствует ожиданиям для хорошо развитого сомкнутого растительного покрова при оптимальной влагообеспеченности;

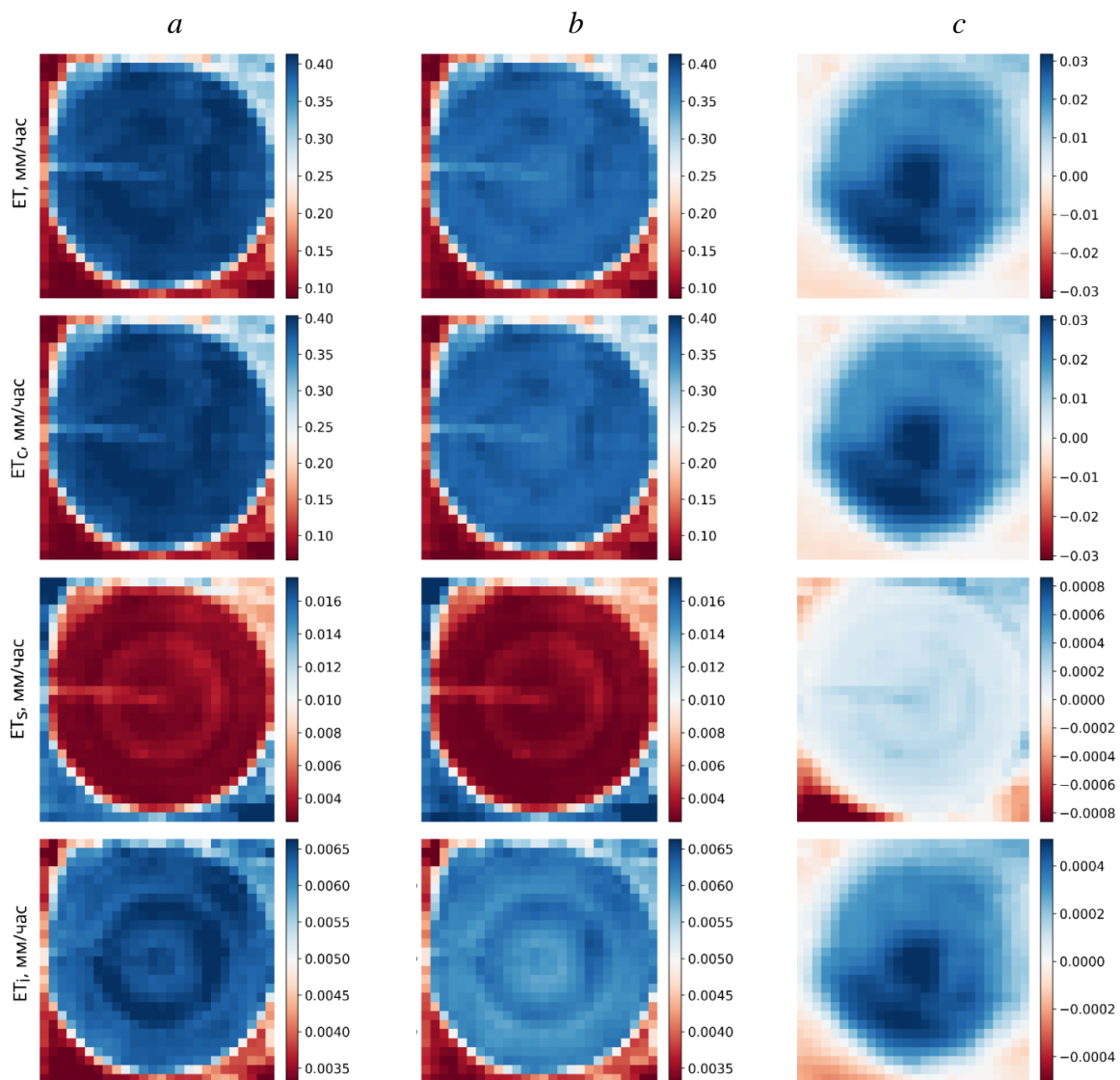
2) на границах поля, за пределами радиуса действия дождевальной машины, баланс составляющих меняется: доля ET_s превышает ET_c , что связано с угнетением растительности из-за дефицита влаги и увеличением доли открытой поверхности почвы;

3) карты распределения выявляют пространственную неоднородность влагообмена, обусловленную техническими особенностями оросительной системы: прослеживаются линейная зона угнетения ET вдоль трассы распределительного трубопровода и концентрические паттерны, повторяющие схему работы отдельных форсунок дождевальной машины;

4) сравнение карт ET , рассчитанных с использованием стандартного метода оценки R_n (рисунок 3a) и модифицированного варианта модели, с данными реанализа ERA5-Land для R_n (рисунок 3b) показало, что в целом пространственные паттерны схожи для всех составляющих ET , это свидетельствует об устойчивости модифицированного алгоритма к изменению источника данных R_n ;

5) карты различий между методами (рисунок 3c) демонстрируют, что абсолютные расхождения ET варьируют от 0 до 0,03 мм/ч. Наиболее существенное снижение оценок ET при использовании реанализа наблюдается на участках с повышенным увлажнением – в центре поля и у его нижней

границы. Это позволяет предположить, что в данных условиях ERA5-Land может переоценивать R_{lu} из-за отсутствия теплового канала.



ET – эвапотранспирация, мм/ч; ET_c – транспирация; ET_s – испарение с поверхности почвы; ET_i – испарение влаги с листовой поверхности

Расчеты выполнены по модели PT-JPL с использованием: *a*) стандартного расчетного метода оценки радиационного баланса (R_n); *b*) скорректированного R_n по данным реанализа ERA5-Land; *c*) разности значений ET между вариантами расчета *a* и *b*

ET – evapotranspiration, mm/h; ET_c – transpiration; ET_s – evaporation from the soil surface; ET_i – moisture evaporation from the leaf surface

Calculations were performed using the PT-JPL model using: *a*) the standard calculation method for estimating the radiation balance (R_n); *b*) updated R_n based on ERA5-Land reanalysis data; *c*) the difference in ET values between calculation options *a* and *b*

Рисунок 3 – Пространственное распределение эвапотранспирации и ее компонентов на орошаемом поле сои на 28.07.2021

Figure 3 – Spatial distribution of evapotranspiration and its components in an irrigated soybean field on July 28, 2021

Таким образом, модифицированная версия модели РТ-JPL с заменой блока расчета R_n данными реанализа ERA5-Land доказала свою работоспособность для количественной оценки и разделения ET , выявив пространственную изменчивость влагообмена, вызванную как агрономическими, так и техническими факторами. Основным ограничением подхода является занижение количественных оценок ET на переувлажненных участках с пониженной температурой, что связано с завышением R_{li} из-за потери информации теплового канала.

В ходе исследования было выявлено систематическое занижение R_n (PBias = 11,3 %) по данным реанализа ERA5-Land по сравнению с измерениями (таблица 1, рисунок 1b). В качестве потенциального источника ошибки может быть рассмотрена неоднородность подстилающей поверхности в пределах ячейки реанализа (≈ 9 км). При попадании в одну ячейку реанализа различных типов экосистем может происходить усреднение радиационных свойств, неадекватное для конкретного типа землепользования. Однако, как показывают литературные данные [17–19], занижение R_n в ERA5-Land наблюдается и для протяженных естественных ландшафтов. Например, для луговых и степных экосистем Тибета было зафиксировано снижение R_n на 19,8 и 21,0 % в суточном и месячном масштабах соответственно [17]. Похожие результаты приводятся также в работе Y. Jing и др. [18], где на основе обширной сети пульсационных измерений по всему Китаю обозначается общая тенденция к занижению R_n в ERA5-Land. При этом вышеуказанное исследование подтверждает в целом высокое качество данных реанализа (KGE = 0,73; PBias = 7,81 %; RMSE = 41,24 Вт/м²). В работе T. Rashid и др. [19] отмечается, что занижение значений R_n в ERA5-Land характерно исключительно для летнего периода, который представляет наибольший интерес в контексте агроэкосистем. Исходя из вышеизложенного, систематическое занижение R_n в ERA5-Land скорее объясняется особенностями параметризации физических процессов в базовой модели

ECMWF, а не является артефактом, связанным со смешанными значениями потоков для экосистем.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является адаптация модели RT-JPL для работы со спутниками или беспилотными аппаратами, которые не имеют тепловых каналов. Это расширяет возможности мониторинга, позволяя использовать альтернативные источники данных для детального наблюдения за динамикой *ET*. Другим преимуществом является использование данных реанализа в качестве входных метеорологических параметров, что обеспечивает потенциал для глобального применения предложенного подхода. Кроме того, отказ от отдельного модуля расчета радиации позволяет избежать связанных с ним неопределенностей, таких как оценка коэффициента прозрачности атмосферы. Использование реанализа, который учитывает вертикальные профили поглощающих газов и аэрозолей, может способствовать снижению этой неопределенности.

В то же время подход имеет несколько ограничений. Первое связано с пространственным масштабом входных данных: в текущей реализации метеорологические величины и баланс длинноволновой радиации принимаются едиными для всего сельскохозяйственного поля. Хотя исследований, количественно оценивающих влияние такой пространственной агрегации на точность модельных оценок в масштабе отдельной агроэкосистемы, в литературе не обнаружено, можно предположить, что данный фактор станет более существенным при региональных оценках, объединяющих множество разнородных полей. Второе ограничение заключается в том, что в текущей реализации оценивается мгновенное значение потока *ET* в момент пролета спутника. Для получения непрерывных временных рядов существуют подходы, основанные на интерполяции *ET* с использованием фракции энергии, затрачиваемой на испарение (*EF*) или на прямом использовании непрерывных данных реанализа. Однако для сельскохозяйственных приложений, помимо учета облачности и атмосферных осадков, кри-

тически важно учитывать антропогенное воздействие, в частности оросительные мероприятия. В этом контексте наиболее перспективным направлением видится интеграция энергобалансовых моделей на основе данных ДЗЗ с имитационными моделями агроэкосистем (CSM). Вегетационные индексы и расчеты потоков по данным ДЗЗ в такой схеме могут использоваться как для ассимиляции данных в CSM, так и для инициализации параметров роста и развития культур [20].

Выводы. В данном исследовании был проведен анализ возможности модификации энергобалансовой модели PT-JPL для оценки ET агроэкосистем путем замены ее стандартного блока расчета R_n данными климатического реанализа ERA5-Land. Проведенное сравнение с наземными измерениями R_n на сельскохозяйственных полях показало, что исходные данные ERA5-Land характеризуются систематическим занижением значений R_n (PBias = 11,3 %) и уступают стандартному расчетному методу модели PT-JPL по метрикам R^2 (0,59 против 0,73) и RMSE (93,7 против 75,9 Вт/м²). Для устранения этого смещения была применена мультипликативная коррекция с коэффициентом $\sim 1,11$. После коррекции качество данных ERA5-Land по R_n улучшилось ($R^2 = 0,69$; RMSE = 80,7 Вт/м²; PBias = 1,3 %) и стало сопоставимым с расчетным методом.

Анализ точности моделирования ET показал, что после коррекции R_n модифицированная версия PT-JPL с данными ERA5-Land обеспечивает точность, эквивалентную оригинальной модели ($R^2 = 0,47$; RMSE = 0,12 мм/ч; PBias = -0,4 %; KGE = 0,71). Это подтверждает принципиальную применимость подхода с заменой расчетного блока R_n данными реанализа. Ключевым практическим преимуществом такой модификации является возможность применения модели PT-JPL совместно со спутниковыми данными, не имеющими тепловых каналов, что существенно расширяет ее операционный потенциал.

Апробация метода на примере орошаемого поля сои в Саратовской

области продемонстрировала адекватность оценок пространственного распределения ET и ее компонентов. Модель в целом успешно визуализирует пространственную неоднородность влагообмена, обусловленную как состоянием растительности, так и техническими особенностями полива. Однако отсутствие теплового канала приводит к потере информации, которая может быть критична при выявлении переувлажненных участков.

В рамках текущей работы оценка проводилась для мгновенных значений ET в момент спутниковой съемки. В качестве перспективного направления дальнейших исследований предлагается разработка метода временной интерполяции ET между пролетами спутника на основе CSM. Такой подход, в отличие от традиционных методов, позволит физически обоснованно учитывать воздействие ключевых влияющих на ET факторов между пролетами спутника, таких как атмосферные осадки и оросительные мероприятия.

Список источников

1. Sarkar S., Sarkar S. A review on impact of climate change on evapotranspiration // Pharma Innovation Journal. 2018. Vol. 7, iss. 11. P. 387–390.
2. Балакай Г. Т., Балакай Н. И. Методика расчета и корректировки сроков полива сельскохозяйственных культур // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2017. № 1(25). С. 32–49. EDN: XWNOQV.
3. Методика оценки биологического водопотребления посевов для решения задач управления водным режимом / Л. В. Козырева, Ю. Р. Ситдикова, А. Е. Ефимов, А. В. Доброхотов // Агрофизика. 2013. № 4. С. 12–19. EDN: RPWOVP.
4. Мониторинг эвапотранспирации на сельскохозяйственном поле, определение норм и сроков полива автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом / А. Е. Ефимов, Ю. Р. Ситдикова, А. В. Доброхотов, Л. В. Козырева // Водные ресурсы. 2018. № 45(1). С. 100–105. DOI: 10.7868/S032105961801008X. EDN: YMEEZJ.
5. К проблеме автоматизации процесса расчетов эвапотранспирации риса / Г. Т. Балакай, Р. Е. Юркова, Л. М. Докучаева, В. И. Ольгаренко, Т. С. Пономаренко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2019. № 1(33). С. 72–91. DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-72-91. EDN: VVQTZD.
6. Салугин А. Н., Балкушкин Р. Н. О применении искусственных нейронных сетей для моделирования водопотребления // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 1. С. 70–84. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-5. EDN: MAMMQZ.
7. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56 / R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. Rome: FAO, 1998. 300 p.

8. Mapping actual evapotranspiration using Landsat for the conterminous United States: Google Earth Engine implementation and assessment of the SSEBop model / G. B. Senay, M. Friedrichs, C. Morton, G. E. Parrish, M. Schauer, K. Khand, S. Kagone, O. Boiko, J. Huntington // *Remote Sensing of Environment*. 2022. Vol. 275. Art. 113011. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113011. EDN: XNRMVE.
9. Alsanjar O., Cetin M. Comparison of actual evapotranspiration by the Google Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) to the METRIC model using remote sensing data and in-situ climate observations // *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 85. Art. 01073. DOI: 10.1051/bioconf/20248501073. EDN: BFSOYT.
10. Baboli N., Ghamarnia H., Hafezparast Mavaddat M. Estimating wheat evapotranspiration through remote sensing utilizing GeeSEBAL and comparing with lysimetric data // *Applied Water Science*. 2024. Vol. 14, iss. 9. Art. 193. DOI: 10.1007/s13201-024-02248-6. EDN: IWEZFK.
11. Satellite-based PT-SinRH evapotranspiration model: Development and validation from AmeriFlux data / Z. Xie, Y. Yao, Y. Li, L. Liu, J. Ning, R. Yu, J. Fan, Y. Kan, L. Zhang, J. Xu, K. Jia // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, iss. 15. Art. 2783. DOI: 10.3390/rs16152783. EDN: SBURQD.
12. Feasibility of using the two-source energy balance model (TSEB) with Sentinel-2 and Sentinel-3 images to analyze the spatio-temporal variability of vine water status in a vineyard / J. Bellvert, C. Jofre-Čekalović, A. Pelechá, M. Mata, H. Nieto // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, iss. 14. Art. 2299. DOI: 10.3390/rs12142299. EDN: PHRTTL.
13. Fisher J. B., Tu K. P., Baldocchi D. D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, iss. 3. P. 901–919. DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.025.
14. Allen R. G., Tasumi M., Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2007. Vol. 133, iss. 4. P. 380–394. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).
15. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications / J. Muñoz-Sabater, E. Dutra, A. Agustí-Panareda, C. Albergel, G. Arduini, G. Balsamo, S. Boussetta, M. Choulga, S. Harrigan, H. Hersbach, B. Martens, D. G. Miralles, M. Piles, N. J. Rodríguez-Fernández, E. Zsoter, C. Buontempo, J. N. Thépaut // *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13. P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021. EDN: EIIZTQ.
16. Assessing FAO-56 dual crop coefficients using eddy covariance flux partitioning / R. G. Anderson, J. G. Alfieri, R. Tirado-Corbalá, J. Gartung, L. G. McKee, J. H. Prueger, D. Wang, J. E. Ayars, W. P. Kustas // *Agricultural Water Management*. 2017. Vol. 179. P. 92–102. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.07.027.
17. Gao L., Zhang Y., Zhang L. Validation and spatiotemporal analysis of surface net radiation from CRA/Land and ERA5-Land over the Tibetan Plateau // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14, iss. 10. Art. 1542. DOI: 10.3390/atmos14101542. EDN: QCMNBH.
18. Jing Y., Bai P., Yang Z. CHiRAD: A high-resolution daily net radiation dataset for China generated using meteorological and albedo data // *Journal of Hydrology*. 2025. Vol. 654. Art. 132854. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.132854. EDN: YOXYAD.
19. Rashid T., Tian D. Improved 30-m evapotranspiration estimates over 145 eddy covariance sites in the contiguous United States: The role of ECOSTRESS, harmonized Landsat Sentinel-2 imagery, climate reanalysis, and deep neural network postprocessing // *Water Resources Research*. 2024. Vol. 60, iss. 4. Art. e2023WR036313. DOI: 10.1029/2023wr036313. EDN: DWZFYV.
20. Research on assimilation of unmanned aerial vehicle remote sensing data and Aq-

uaCrop model / W. Li, M. Li, M. Awais, L. Ji, H. Li, R. Song, M. J. M. Cheema, R. Agarwal // Sensors. 2024. Vol. 24, iss. 10. Art. 3255. DOI: 10.3390/s24103255. EDN: FAGYBM.

References

1. Sarkar S., Sarkar S., 2018. A review on impact of climate change on evapotranspiration. *Pharma Innovation Journal*, vol. 7, iss. 11, pp. 387-390.
2. Balakay G.T., Balakay N.I., 2017. *Metodika rascheta i korrrektirovki srokov poliva sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Calculating and correcting the agricultural crops irrigation schedule]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of the Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 1(25), pp. 32-49, EDN: XWNOQV. (In Russian).
3. Kozyreva L.V., Sitdikova Yu.R., Efimov A.E., Dobrokhotov A.V., 2013. *Metodika otsenki biologicheskogo vodopotrebleniya posevov dlya resheniya zadach upravleniya vodnym rezhimom* [Methodology for assessing the biological water consumption of crops to solve water regime management problems]. *Agrofizika* [Agrophysics], no. 4, pp. 12-19, EDN: RPWOVP. (In Russian).
4. Efimov A.E., Sitdikova Yu.R., Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V., 2018. *Monitoring evapotranspiratsii na sel'skokhozyaystvennom pole, opredelenie norm i srokov poliva avtomatizirovannym mobil'nym polevym agrometeorologicheskim kompleksom* [Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex]. *Vodnye resursy* [Water Resources], no. 45(1), pp. 100-105, DOI: 10.7868/S032105961801008X, EDN: YMEEZJ. (In Russian).
5. Balakay G.T., Yurkova R.Ye., Dokuchaeva L.M., Olgarenko V.I., Ponomarenko T.S., 2019. *K probleme avtomatizatsii protsessa raschetov evapotranspiratsii risa* [On issue of automation of rice evapotranspiration calculation process]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of the Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 1(33), pp. 72-91, DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-72-91, EDN: VVQTZD. (In Russian).
6. Salugin A.N., Balkushkin R.N., 2021. *O primenenii iskusstvennykh neyronnykh setey dlya modelirovaniya vodopotrebleniya* [On application of artificial neural networks for modeling water consumption]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management], no. 1, pp. 70-84, DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-5, EDN: MAMMQZ. (In Russian).
7. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, FAO, 300 p.
8. Senay G.B., Friedrichs M., Morton C., Parrish G.E., Schauer M., Khand K., Kagone S., Boiko O., Huntington J., 2022. Mapping actual evapotranspiration using Landsat for the conterminous United States: Google Earth Engine implementation and assessment of the SSEBop model. *Remote Sensing of Environment*, vol. 275, art. 113011, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113011, EDN: XNRMVE.
9. Alsanjar O., Cetin M., 2024. Comparison of actual evapotranspiration by the Google Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) to the METRIC model using remote sensing data and in-situ climate observations. *BIO Web of Conferences*, vol. 85, art. 01073, DOI: 10.1051/bioconf/20248501073, EDN: BFSOYT.
10. Baboli N., Ghamarnia H., Hafezparast Mavaddat M., 2024. Estimating wheat evapotranspiration through remote sensing utilizing GeeSEBAL and comparing with lysimetric data. *Applied Water Science*, vol. 14, iss. 9, art. 193, DOI: 10.1007/s13201-024-02248-6, EDN: IWEZFK.
11. Xie Z., Yao Y., Li Y., Liu L., Ning J., Yu R., Fan J., Kan Y., Zhang L., Xu J., Jia K.,

2024. Satellite-based PT-SinRH evapotranspiration model: Development and validation from AmeriFlux data. *Remote Sensing*, vol. 16, iss. 15, art. 2783, DOI: 10.3390/rs16152783, EDN: SBURQD.

12. Bellvert J., Jofre-Čekalović C., Pelechá A., Mata M., Nieto H., 2020. Feasibility of using the two-source energy balance model (TSEB) with Sentinel-2 and Sentinel-3 images to analyze the spatio-temporal variability of vine water status in a vineyard. *Remote Sensing*, vol. 12, iss. 14, art. 2299, DOI: 10.3390/rs12142299, EDN: PHRTTL.

13. Fisher J.B., Tu K.P., Baldocchi D.D., 2008. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, iss. 3, pp. 901-919, DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.025.

14. Allen R.G., Tasumi M., Trezza R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 133, iss. 4, pp. 380-394, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).

15. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.N., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, vol. 13, pp. 4349-4383, DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021, EDN: EIIZTQ.

16. Anderson R.G., Alfieri J.G., Tirado-Corbalá R., Gartung J., McKee L.G., Prueger J.H., Wang D., Ayars J.E., Kustas W.P., 2017. Assessing FAO-56 dual crop coefficients using eddy covariance flux partitioning. *Agricultural Water Management*, vol. 179, pp. 92-102, DOI: 10.1016/j.agwat.2016.07.027.

17. Gao L., Zhang Y., Zhang L., 2023. Validation and spatiotemporal analysis of surface net radiation from CRA/Land and ERA5-Land over the Tibetan Plateau. *Atmosphere*, vol. 14, iss. 10, art. 1542, DOI: 10.3390/atmos14101542, EDN: QCMNBH.

18. Jing Y., Bai P., Yang Z., 2025. CHiRAD: A high-resolution daily net radiation dataset for China generated using meteorological and albedo data. *Journal of Hydrology*, vol. 654, art. 132854, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.132854, EDN: YOXYAD.

19. Rashid T., Tian D., 2024. Improved 30-m evapotranspiration estimates over 145 eddy covariance sites in the contiguous United States: The role of ECOSTRESS, harmonized Landsat Sentinel-2 imagery, climate reanalysis, and deep neural network postprocessing. *Water Resources Research*, vol. 60, iss. 4, art. e2023WR036313, DOI: 10.1029/2023wr036313, EDN: DWZFYV.

20. Li W., Li M., Awais M., Ji L., Li H., Song R., Cheema M.J.M., Agarwal R., 2024. Research on assimilation of unmanned aerial vehicle remote sensing data and AquaCrop model. *Sensors*, vol. 24, iss. 10, art. 3255, DOI: 10.3390/s24103255, EDN: FAGYBM.

Информация об авторах

А. В. Доброхотов – старший научный сотрудник отдела физики, физико-химии и биофизики почв, кандидат биологических наук, Агрофизический научно-исследовательский институт (195220, г. Санкт-Петербург, пр-т Гражданский, д. 14), adobrokhotov@agrophys.ru, ORCID: 0000-0002-9368-6229;

Л. В. Козырева – научный сотрудник, кандидат технических наук, Агрофизический научно-исследовательский институт (195220, г. Санкт-Петербург, пр-т Гражданский, д. 14), 4ludak@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7990-8211;

Д. П. Мухина – аспирант, Агрофизический научно-исследовательский институт (195220, г. Санкт-Петербург, пр-т Гражданский, д. 14), darin.m.19.13.21@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1654-7000.

Information about the authors

A. V. Dobrokhoto – Senior Researcher of the Department of Soil Physics, Physical Chemistry and Biophysics, Candidate of Biological Sciences, Agrophysical Research Institute (195220, Saint-Petersburg, Grazhdanskiy ave., 14), adobrokhoto@agrophys.ru, ORCID: 0000-0002-9368-6229;

L. V. Kozyreva – Researcher of the Department of Soil Physics, Physical Chemistry and Biophysics, Candidate of Technical Sciences, Agrophysical Research Institute (195220, Saint-Petersburg, Grazhdanskiy ave., 14), 4ludak@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7990-8211;

D. P. Mukhina – Postgraduate Student of the Department of Soil Physics, Physical Chemistry and Biophysics, Agrophysical Research Institute (195220, Saint-Petersburg, Grazhdanskiy ave., 14), darin.m.19.13.21@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1654-7000.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 28.01.2026; одобрена после рецензирования 15.04.2026;
принята к публикации 16.06.2026.*

The article was submitted 28.01.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 16.06.2026.