

УДК 519.688:528.88:556.551

## РАСЧЕТ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ БАССЕЙНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

**А. М. Расулова**

*Институт озероведения РАН, Санкт-Петербургский Федеральный  
исследовательский центр РАН, Россия*

Оценивается возможность расчета эвапотранспирации и валовой первичной продукции по комбинированной биофизической модели Пенмана – Монтейта – Леунинга на больших территориях водосборов. В частности, в работе рассмотрено применение указанной модели для водосбора Ладожского озера. Описаны теоретические основы модели, схема ее реализации и возможности обращения к ней через интерфейс облачной платформы анализа и обработки геопространственных данных Google Earth Engine. Модель в качестве входных данных о свойствах подстилающей поверхности использует спутниковые снимки MODIS, для метеорологических – модель реанализа GLDAS, подстилающая поверхность классифицирована согласно классификации IBCG. На основе модели Пенмана – Монтейта – Леунинга получены карты геопространственного распределения эвапотранспирации и составляющих ее компонент (транспирации растительности, испарения с почвы, испарения осадков, перехваченных растительностью) и валовой первичной продукции на водосборе Ладожского озера. Результаты указывают на то, что максимальная эвапотранспирация и валовая первичная продукция достигается на юге Ладожского водосбора, в районах смешанных лесов. Согласно модели за период с июля 2002 по декабрь 2017 года не отмечено существенного изменения валовой первичной продукции, эвапотранспирации и ее компонент. Для всех компонент эвапотранспирации и валовой первичной продукции наблюдается сезонность, связанная с вегетационным периодом в регионе. Результаты, полученные на основе модели, согласуются с данными по испарению и валовой первичной продукции, приведенными другими авторами. Это обеспечивает хорошую согласованность модели Пенмана – Монтейта – Леунинга для применения ее к водосбору Ладожского озера. Результаты работы могут быть использованы для эффективно-го водопользования, в частности мелиорации сельскохозяйственных угодий на исследуемой территории.

**Ключевые слова:** модель Пенмана – Монтейта – Леунинга; Google Earth Engine; Ладожский водосбор; дистанционное зондирование Земли; MODIS; транспирация растительности; испарение с почвы; валовая первичная продукция.

### **A. M. Rasulova. CALCULATING EVAPOTRANSPIRATION FOR THE LAKE LADOGA CATCHMENT AREA**

The paper evaluates the possibility of calculating evapotranspiration and gross primary production using a coupled biophysical Penman-Monteith-Leuning model for large catchment areas. In particular, the paper considers the application of the Penman-Monteith-Leuning model for the Lake Ladoga catchment. The theoretical foundations of the model,

its flowchart, and the possibility of accessing it through the interface of the cloud platform for the analysis and processing of geospatial data Google Earth Engine are outlined. The model uses MODIS satellite images as input data, from which it receives the properties of the underlying surface. For meteorological data, the model uses the reanalysis model GLDAS. The land cover is classified according to the IBCG classification. Based on the Penman-Monteith-Leuning model, maps of the geospatial distribution of evapotranspiration and its constituent components (vegetation transpiration, soil evaporation, interception from vegetation canopy) and gross primary production in the Lake Ladoga catchment were obtained. The results indicate that evapotranspiration and gross primary production were the greatest in the south of the Lake Ladoga catchment, in areas of mixed forests. For the period from July 2002 to December 2017, there was no significant change in gross primary production, evapotranspiration and its components. For all components of evapotranspiration and gross primary production, seasonality associated with the growing season in the region is observed. The model outputs are consistent with the data on evaporation reported by other authors. The Penman-Monteith-Leuning model is hence fit for application to the Lake Ladoga catchment. The results of the study can be used for efficient water management, in particular for the reclamation of agricultural land in the study area.

**Keywords:** Penman-Monteith-Leuning model; Google Earth Engine; Lake Ladoga catchment; remote sensing of the Earth; MODIS; transpiration by vegetation; evaporation from the soil; gross primary production.

## Введение

Эвапотранспирация является неотъемлемой частью водного баланса и определяется множеством характеристик. К основным из них относятся климатические характеристики, подстилающая поверхность и растительность. Эвапотранспирацию ( $ET$ ) определяют как сумму транспирации растительности ( $E_t$ ), испарения с почвы ( $E_s$ ) и испарения осадков, задержанных растительностью ( $E_r$ ):

$$ET = E_t + E_s + E_r. \quad (1)$$

Как правило, компоненты суммарной эвапотранспирации определяются в совокупности. Зная величину эвапотранспирации, можно определить валовый первичный продукт (GPP, от англ. Gross Primary Production), т. е. скорость, с которой солнечная энергия усваивается в процессе фотосинтеза и образует молекулы сахара, генерируя биомассу экосистемы. GPP напрямую зависит от транспирации с растительности, два других слагаемых в (1) лишь косвенно влияют на ассимиляцию углерода растениями. Определение компонент (1) основано на методе Пенмана – Монтейта [Monteith, 1965]. Он учитывает климат исследуемого региона, типы подстилающей поверхности и разнообразие растительного покрова.

В настоящей работе исследовался водосбор Ладожского озера. Его площадь занимает примерно 282 тыс. км<sup>2</sup> и расположена на территориях Северо-Западного региона России и Финляндии. Бассейн Ладожского озера делится на четыре частных водосбора –

Сайма-Вуоксинский, Ильмень-Волховский, Онежско-Свирский и собственный Ладожский. Климат изучаемой территории относится к типично бореальному и умеренно континентальному в восточной части водосбора. Вегетационный период длится примерно 150–175 суток. На территории Ладожского бассейна наблюдается повышенная влажность воздуха. Так, на пунктах мониторинга, находящихся на собственном Ладожском водосборе, наблюдается влажность воздуха в среднем 85–90 % с ноября по январь и 65–75 % в мае–июне. В температурном режиме могут проявляться значительные колебания с годовой амплитудой средних температур наиболее теплого и наиболее холодного месяцев в 26–30°. Самыми холодными месяцами являются январь–февраль со средними температурами от –6,8 до –9,8 °С, самым теплым месяцем – июль со средней температурой +15,2...+17,2 °С. В южной части водосбора среднегодовая температура составляет +3 °С, в северной – +1,5 °С. Величина суммарной солнечной радиации летом достигает 9,5–14,5 ккал/см<sup>2</sup>, зимой, в феврале, – 2 ккал/см<sup>2</sup> [Ладожское..., 2015]. Годовое количество осадков на территории бассейна Ладожского озера составляет от 600 до 800 мм/год, большая часть из них выпадает в виде снега [Кудерский, 2013; Ладожское..., 2015]. При этом регион характеризуется небольшим испарением (350–450 мм/год). Это ведет к созданию на территории Ладожского водосбора избытка влаги. Однако влага не может быть полностью использована растениями на транспирацию и увеличение биомассы или

испариться с почвы в силу недостаточного тепла [Исаченко и др., 1965; Исаченко, 1991]. С учетом низменного рельефа это приводит к заболачиванию и образованию мощных торфяных залежей (до 8–10 м).

Одним из немаловажных факторов, влияющих на эвапотранспирацию, также являются почвы. На севере и северо-западе водосбора в области Балтийского кристаллического щита преобладает сельговый ландшафт с примитивно-аккумулятивными почвами, карликовыми подзолами, глееподзолистыми и низинными болотными почвами, развитыми на делювии кислых изверженных пород. При движении на юго-восток ландшафт меняется на кристаллический фундамент, перекрытый маломощной толщей четвертичных отложений. Подстилающая поверхность здесь представляет собой подзолы и дерново-подзолистые глеевые почвы в сочетании с торфяно-болотными и болотными почвами низинного типа. На северо-востоке Онежско-Свирского частного водосбора преобладают дерновые литогенные почвы, иллювиально-железогумусовые подзолы, торфяно-болотные почвы, развитые на делювии основных и ультраосновных изверженных пород. В южных частях собственного Ладожского и Онежско-Свирского водосборов преобладает низменный моренный рельеф. Почвы представляют собой сочетание подзолистых, торфяно-подзолисто-глеевых и болотных верхового и переходного типов. В области Русской равнины, на большей части Ильмень-Волховского водосбора, находятся водно-ледниковые и моренные равнины, почвы средне- и сильноподзолистые с дерново-подзолисто-глеевыми и торфяно-подзолисто-глеевыми. В южной и восточной частях Ильмень-Волховского водосбора – возвышенный холмисто-моренный рельеф. В этих частях преобладают развитые на промытых карбонатных и бескарбонатных суглинках автоморфные слабоподзолистые и дерново-подзолистые остаточно-карбонатные почвы [Исаченко и др., 1965; Ладожское..., 2015].

Одними из главных составляющих эвапотранспирации и валового первичного продукта являются растительность и распаханность территории Ладожского бассейна. Водосбор находится в пределах трех геоботанических подзон тайги – северной, средней и южной. На собственном Ладожском и Сайма-Вуоксинском водосборах преобладают в основном сосновые среднетаежные леса, в низменностях рельефа – темнохвойные разреженные еловые леса с примесью березы. На Онежско-Свирском водосборе чаще главенствуют среднетаежные леса – ельники-черничники без подлеска со сплошным покровом зеленых

мхов и сомкнутым древостоем. По мере движения к югу по Ильмень-Волховскому водосбору начинает доминировать южно-таежная растительность. На юге Ильмень-Волховского водосбора преобладают смешанные широколиственно-хвойные леса с кустарниковым ярусом [Ладога..., 2013]. При этом на леса приходится 55 % площади российской части водосбора и 11 % – на сельскохозяйственное производство. Наиболее распространенными сельскохозяйственными культурами являются картофель и кормовые культуры для животноводства.

Из описания территории бассейна Ладожского озера можно сделать вывод о наличии климатического и почвенного разнообразия. Это следует учитывать при выборе модели расчета эвапотранспирации и валовой первичной продукции.

Основными целями работы являются:

- расчет и анализ эвапотранспирации, ее компонент и валовой первичной продукции по модели Пенмана – Монтейта – Леунига для водосбора Ладожского озера с 2002 по 2017 г.;
- получение геопространственного распределения указанных характеристик на исследуемой территории и динамики их изменения за выбранный промежуток времени;
- проверка согласованности результатов расчета по модели Пенмана – Монтейта – Леунига с натурными данными и возможности ее применения для выделенных водосборов.

В силу сложности экспериментального исследования процессов естественного испарения с почвы и транспирации с растительности на всей территории водосбора Ладожского озера наиболее оптимальным методом оценки эвапотранспирации является математическое моделирование на основе спутниковых данных. Моделирование процесса эвапотранспирации было сделано на основе метода Пенмана – Монтейта – Леунига.

Существуют различные методы определения эвапотранспирации. В России наиболее часто используют методы теплового и водного баланса [Мезенцев, Карнацевич, 1969]. Однако они не учитывают возможную неоднородность почв на исследуемой территории и вычисляют только суммарную эвапотранспирацию. Также широко распространены методы нахождения эвапотранспирации в зависимости от определенных климатических факторов и биофизические методы, которые учитывают отклик растений на внешние факторы [Шаров, 1959; Штойко, 1965; Мезенцев, Карнацевич, 1969; Черемисинов, Черемисинов, 2016]. В 1990 г. Продовольственная и сельскохозяйственная организация

ООН (ФАО) (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO), одной из основных задач которой является повышение продуктивности сельского хозяйства и эффективности агропродовольственных систем, рекомендовала в качестве метода оценки эвапотранспирации метод Пенмана – Монтейта. Несомненными достоинствами данного метода являются его биофизическая устойчивость, учет неоднородностей подстилающей поверхности и климатических параметров. Однако модель Пенмана – Монтейта не лишена недостатков. Основные из них – это неопределенность, возникающая при классификации подстилающей поверхности, и отсутствие учета вариаций транспирации с водной поверхности, снега и льда в зависимости от географических зон.

### Материалы и методы

В основе модели Пенмана – Монтейта – Леунинга лежит расчет эвапотранспирации на основе уравнений теплового баланса и массопереноса с открытой водной поверхности, впервые предложенный Г. Л. Пенманом [Penman, 1948]. В 1964 г. это уравнение модифицировано Дж. Л. Монтейтом с учетом растительности и почвы, которые были включены в уравнение в виде аэродинамического сопротивления и теплового потока почвы соответственно [Monteith, 1965]. Аэродинамическое сопротивление учитывает перенос тепла и паров воды с поверхности растения. Позднее уравнение Пенмана – Монтейта (модель РМ или FAO-56) было доработано Р. Леунингом формулировкой поверхностной проводимости, в которой учтены физические характеристики растительного покрова и потеря влаги почвой (модель PML) [Leuning et al., 2008]. Модель PML была усовершенствована за счет включения испарения осадков, перехватываемых растениями, и разделения компонент суммарной эвапотранспирации на  $E_s$ ,  $E_t$  и  $E_i$  (модель PML\_V1) [Zhang et al., 2016]. Впоследствии модель PML\_V1 была соединена с биофизической проводимостью полога, что дало возможность использовать ее для расчета валовой первичной продукции (модель PML\_V2) [Gan et al., 2018].

Модификацию уравнения Пенмана – Монтейта с разделением компонент транспирации растительности (2, 3), испарения с почвы (2, 4) и испарения осадков, перехватываемых растительностью (5), можно записать в виде системы уравнений:

$$E_t + E_s = \frac{\varepsilon A + (\rho c_p / \gamma) D_a G_a}{\varepsilon + 1 + G_a / G_s}, \quad (2)$$

$$E_t = \frac{\varepsilon A_c + (\rho c_p / \gamma) D_a G_a}{\varepsilon + 1 + G_a / G_c}, \quad (3)$$

$$E_s = \frac{f \varepsilon A_s}{\varepsilon + 1}, \quad (4)$$

$$E_i = \begin{cases} f_v P, & \text{при } P < P_{wet} \\ f_v P_{wet} + f_{ER} (P - P_{wet}), & \text{при } P \geq P_{wet} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon = \frac{1}{\gamma} \frac{de^0(T_a)}{dT}$ ,  $\gamma$  – психрометрическая постоянная, кПа/°С,  $\frac{de^0(T_a)}{dT}$  – тангенс угла наклона

кривой насыщенного водяного пара, кПа/°С;  $A = R_n - G$  – разница радиации, поглощенной поверхностью растений,  $A_c$ , и радиации, поглощенной почвой,  $A_s$ , т. е. общая доступная растению энергия, МДж/(м<sup>2</sup>·сут);  $\rho$  – средняя плотность воздуха при постоянном давлении, г/м<sup>3</sup>,  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(г·°С);  $D_a = e^*(T_a) - e_a$  – дефицит давления водяных паров в воздухе, кПа,  $e^*(T_a)$  – давление насыщенного водяного пара при температуре  $T_a$ , кПа;  $e_a$  – фактическое давление водяного пара, кПа;  $G_a$  – аэродинамическая проводимость, м/с;  $G_s$  – поверхностная проводимость почвы, м/с;  $G_c$  – проводимость растительного покрова, м/с;  $f$  – безразмерная переменная, определяющая доступность испарения воды с почвы;  $f_v$  – безразмерная величина, показывающая эффективную часть почвы, покрытой растительностью;  $f_{ER}$  – безразмерная величина, характеризующая отношение средней скорости испарения к средней интенсивности осадков;  $P$  – суточное количество осадков, мм/сут;  $P_{wet}$  – эталонное пороговое количество осадков, если полог влажный, мм/сут. Общая доступная растению энергия  $A$  является экспоненциальной функцией индекса поверхности листвы (LAI) и коэффициента экстинкции ( $k_Q$ ).

Аэродинамическая проводимость  $G_a$  в (2)–(3) показывает интенсивность переноса тепла и водяных паров с поверхности испарения в атмосферу поверх кроны и зависит от скорости ветра, температуры и влажности воздуха, высоты растительного покрова, шероховатости подстилающей поверхности, т. е., по сути, описывает ветровой режим в кронах растений.

Проводимость растительности  $G_c$  в (3) определяется следующим выражением:

$$G_c = \frac{g_{sx}}{k_Q} \ln \left( \frac{Q_h + Q_{50}}{Q_h \exp(-k_Q LAI) + Q_{50}} \right) \left( \frac{1}{1 + D_a / D_{50}} \right),$$

где  $g_{sx}$  – максимальная устьичная проводимость листьев в верхней части полога, м/с;

$k_Q$  – коэффициент экстинкции для фотосинтетической активной радиации;  $Q_h$  – интенсивность фотосинтетической активной радиации (PAR) в верхней части полога, МДж/(м<sup>2</sup>·сут);  $Q_{50}$  и  $D_{50}$  – интенсивность фотосинтетической радиации в верхней части полога и дефицит давления водяных паров в воздухе соответственно при  $\frac{g_{sx}}{2}$ .

Доступность испарения воды с почвы  $f$  в (3)–(4) определяется как минимум функции отношения накопленных осадков за  $i$ -й день  $P_i$  к средней скорости равновесного испарения с поверхности почвы за  $i$ -й день  $E_{eq-s,i}$ :

$$f = \min \left( \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n E_{eq-s,i}}, 1 \right).$$

Оценка испарения осадков, перехваченных растительностью,  $E_r$ , в модели PML\_V1 происходит на основе модификации аналитической модели Гэша [Gash, 1979], включающей в себя характеристики растительного покрова и осадков.

Как уже было сказано выше, в модели PML\_V2 можно рассчитать валовую первичную продукцию (GPP). Оценка GPP основана на модели устьичной проводимости  $g_s$  [Ball et al., 1987], в которую включены модели биохимической составляющей фотосинтеза [Collatz et al., 1991], и имеет вид:

$$GPP = \frac{P_1 C_a}{k_Q (P_2 + P_4)} \cdot \left[ k_Q LAI + \ln \left( \frac{P_2 + P_3 + P_4}{P_2 + P_3 \exp\{k_Q LAI\} + P_4} \right) \right],$$

где  $P_1 = A_m \beta I_0 \eta$ ,  $P_2 = A_m \beta I_0$ ,  $P_3 = A_m \eta C_a$ ,  $P_4 = \beta I_0 \eta C_a$ ,  $I_0$  – падающий поток PAR, мкмоль/(м<sup>2</sup>·с);  $\beta$  – тангенс угла наклона начала кривой светового отклика к скорости ассимиляции, мкмоль·CO<sub>2</sub>/(мкмоль·PAR);  $\eta$  – тангенс угла наклона начала кривой отклика CO<sub>2</sub> на скорость ассимиляции, мкмоль/(м<sup>2</sup>·с);  $C_a$  – концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере, мкмоль/моль;  $A_m$  – максимальная скорость фотосинтеза, полученная при насыщении  $I$  и  $C_a$ , мкмоль/(м<sup>2</sup>·с).

С учетом большой площади водосбора для численных расчетов была выбрана реализация модели Пенмана – Монтейта – Леунинга на базе облачной платформы обработки и анализа геопространственных данных Google Earth Engine (GEE). Схема работы модели подробно описана в [Zhang et al., 2019], здесь приводится только ее упрощенный

вид (рис. 1). Из рис. 1 видно, что в качестве входных геопространственных данных используются снимки с MODIS (от англ. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения) с разрешением 500 м и интервалом 1–4 дня, а также с разрешением 1 км и интервалом 8 дней. Методами сглаживания и интерполяции спутниковые снимки приводят к 8-дневным периодам. Обработанные 8-дневные снимки дешифрируют и получают данные об индексе поверхности листа, альбедо «белого неба» и радиации. Также на вход модели поступают 3-часовые климатические данные с модели реанализа GLDAS (от англ. Global Land Data Assimilation System – Глобальная система ассимиляции данных о суше) с разрешением 0,25 градуса. В качестве климатических данных модель использует приведенные к 8-дневным: максимальную, минимальную и среднюю температуру, атмосферное давление, скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью, удельную влажность воздуха, осадки, длинноволновую и коротковолновую составляющие солнечной радиации. Входные биофизические данные рассчитываются по спутниковым снимкам MODIS и включают в себя параметры подстилающей поверхности, основанные на классификации IGBP (от англ. International Geosphere-Biosphere Programme – Международная геосферно-биосферная программа). К ним относятся (обозначения приведены в соответствии с кодом программы и ее блок-схемой (рис. 1)): Alpha – тангенс угла наклона кривой светового отклика к скорости ассимиляции, Theta – тангенс угла наклона кривой реакции на CO<sub>2</sub> в зависимости от скорости ассимиляции,  $m$  – коэффициент устьичной проводимости,  $A_m$  – максимальная каталитическая емкость RuBisCO на единицу площади листа при 25 °С,  $D_0$  – дефицит давления водяного пара в воздухе,  $k_Q$  – коэффициент экстинкции PAR,  $k_A$  – коэффициент затухания доступной энергии,  $S_{sls}$  – удельная емкость накопления дождевых осадков в навесе на единицу площади листьев,  $f_{ERO}$  – удельное отношение средней скорости испарения к средней интенсивности дождя во время штормов на единицу растительного покрова.

Расчет эвапотранспирации, ее компонент и валовой первичной продукции происходит по формулам, описанным выше, на серверах GEE для всей поверхности Земли. Выходные данные для дальнейшей обработки доступны через пользовательский интерфейс GEE и являются объектом ImageCollection. Код моде-

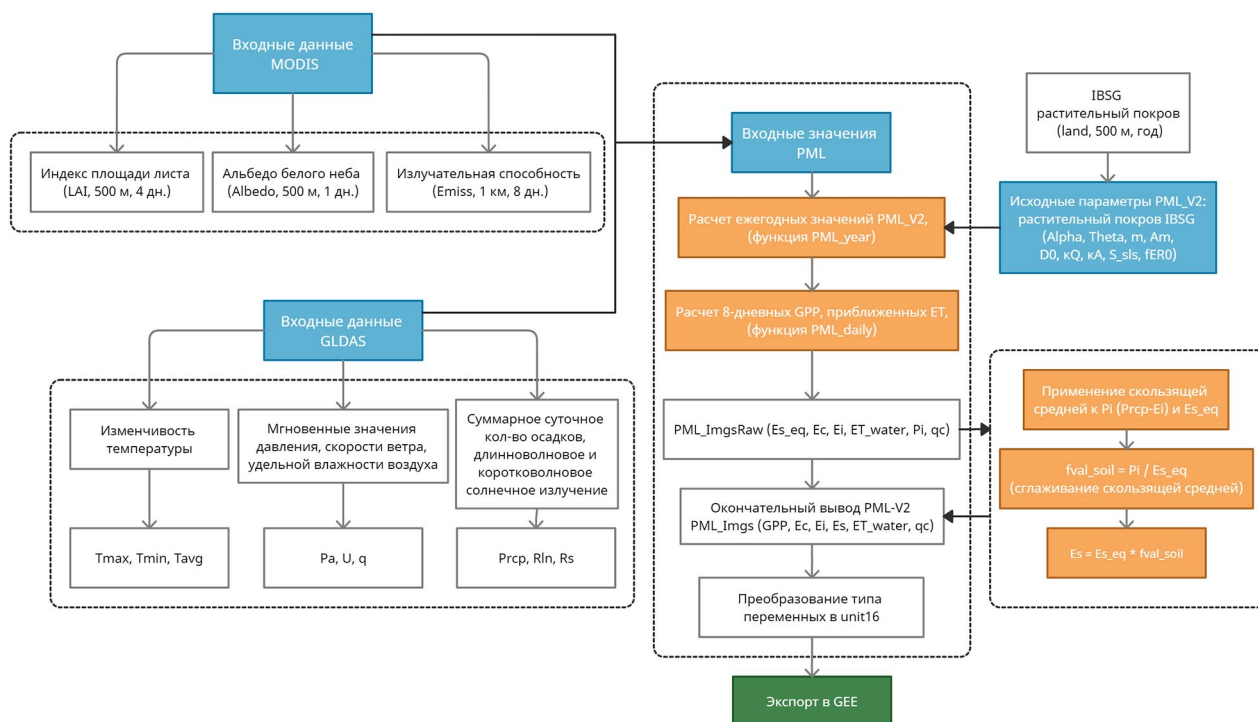


Рис. 1. Блок-схема реализации модели Пенмана – Монтейта – Леунинга в Google Earth Engine:

Tmax, Tmin, Tavg – максимальная, минимальная и средняя дневная температура воздуха (°C), Pa – атмосферное давление (Па), U – скорость ветра на высоте 10 м (м/с), q – удельная влажность воздуха (кг/кг), Prcp – осадки (мм/сут), Rln – длинноволновая солнечная радиация (Вт/м<sup>2</sup>), Rs – коротковолновая солнечная радиация (Вт/м<sup>2</sup>), Es\_eq – равновесное испарение (мм/сут), ET\_water – испарение с зеркала водоема, снега и льда (мм/сут), qc – переменная контроля качества для альbedo и излучения поверхности, Alpha, Theta, m, Am, D0, kQ, kA, S\_sls, fER0 – параметры растительного покрова IBSG, Pi = Prc-Ei. Все входные значения для PML агрегированы до 8-дневных

Fig. 1. Block diagram of the Penman-Monteith-Leuning model implementation in the Google Earth Engine:

The daily maximum, minimum and mean air temperature, Tmax, Tmin, Tavg (°C); atmospheric pressure, Pa (Pa); wind speed at 10-m height, U (m/s); specific air humidity, q (kg/kg); precipitation, Prcp (mm/day); longwave solar radiation, Rln, (W/m<sup>2</sup>); short-wave solar radiation, Rs (W/m<sup>2</sup>); equilibrium evaporation, Es\_eq (mm/day); water body, snow and ice evaporation, ET\_water (mm/day); quality control variable for albedo and surface radiation, qc; vegetation parameters of IBSG (Alpha, Theta, m, Am, D0, kQ, kA, S\_sls, fER0), Pi = Prc-Ei. All input values for PML are aggregated to 8 days

ли находится в открытом доступе на [GitHub] и распространяется по лицензии GPLv2. В GEE модель Пенмана – Монтейта – Леунинга доступна в качестве каталога данных [PML...]. Обращение к модели происходит за счет выполнения пользовательских запросов, написанных в редакторе кода в GEE с помощью функций из библиотеки API [Earth...].

К основным недостаткам моделей PML\_V1 и PML\_V2 относится использование архива спутниковых данных, который может быть недоступен для некоторых регионов в силу географического положения, а также отсутствия непрерывного ряда спутниковых снимков с недельными интервалами съемки одной и той же площади. Еще одним недостатком является отсутствие возможности прогнозирования эвапотранспирации и валовой первичной продукции без привлечения данных с других прогнозных климатических и биофизических моделей.

## Результаты и обсуждение

В рамках применения модели Пенмана – Монтейта – Леунинга к водосбору Ладожского озера был написан сценарий для GEE. Работа программы происходит по следующему алгоритму:

1. Обращение к файлу с контурами Ладожского водосбора. Этот файл получен на основе цифровой модели рельефа и загружен в пользовательский каталог GEE.
2. Обращение к каталогу данных PML\_V2 с учетом исследуемой территории и определенного временного интервала. Временной промежуток работы модели ограничивается доступными спутниковыми снимками MODIS (с 4 июля 2002 г. по 27 декабря 2017 г.).
3. Вызов выходных данных модели PML\_V2 –  $E_s$ ,  $E_i$ , GPP.
4. Геопространственная визуализация переменных из п. 3 с учетом их возможных мини-

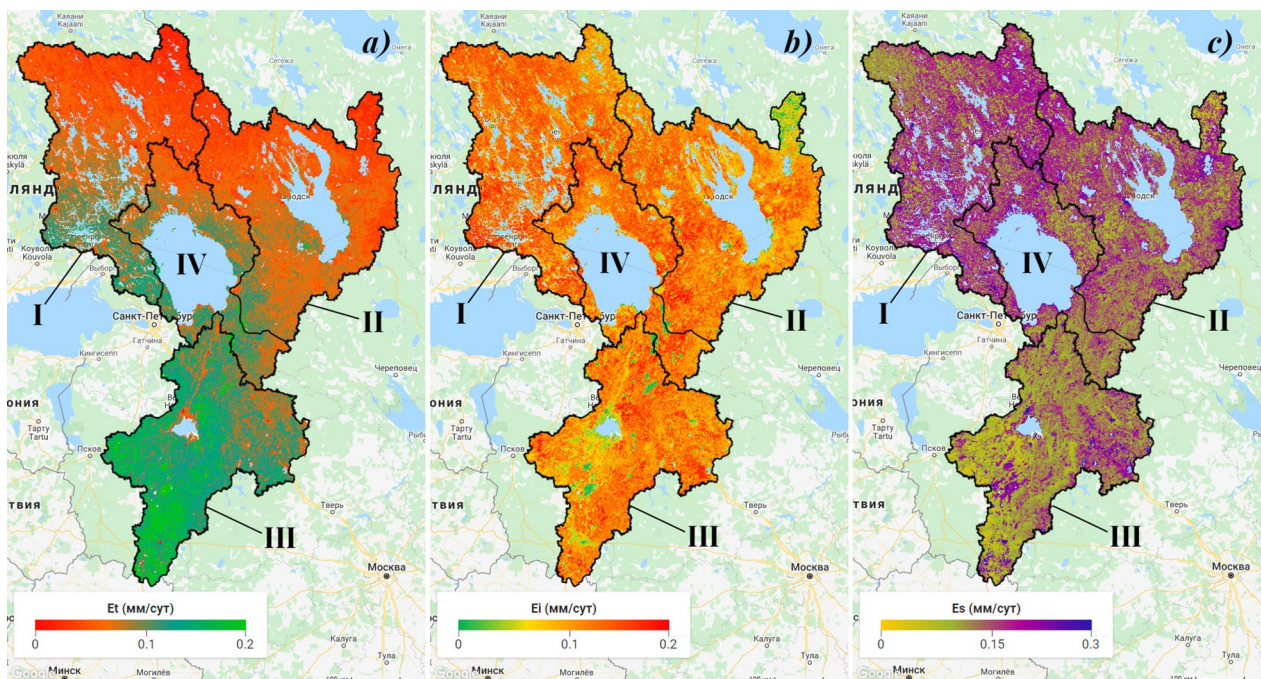


Рис. 2. Карты геопространственного распределения медианных значений компонент полного испарения на Ладожском водосборе с 2002 по 2017 г., построенных по модели PML\_V2:

а) транспирация растительности ( $E_t$ ), б) испарение осадков, перехваченных растительностью ( $E_i$ ), с) испарение с почвы ( $E_s$ ). Здесь и на рис. 3 римскими цифрами обозначены частные водосборы: I – Сайма-Вуоксинский, II – Онежско-Свирский, III – Ильмень-Волховский, IV – собственный Ладожский

Fig. 2. Maps of the geospatial distribution of the median values of the components of total evaporation in the Ladoga catchment from 2002 to 2017, constructed using the PML\_V2 model:

a) vegetation transpiration ( $E_t$ ), b) interception from vegetation canopy ( $E_i$ ), c) soil evaporation ( $E_s$ ). Roman numerals are the partial catchment areas: I – Saimaa-Vuoksinskie, II – Onega-Svirsky, III – Ilmen-Volkhov, IV – own Ladoga

мальных и максимальных значений в исследуемом регионе (рис. 2, 3), как и медианных значений за весь интервал времени, доступный модели.

##### 5. Динамическая визуализация переменных из п. 3.

Результаты выполнения сценария приведены на рис. 2–5. Из рис. 2 (а) видно, что транспирация растительности максимальна на юге Ильмень-Волховского бассейна, где преобладают лиственные леса, и минимальна на севере водосбора, где произрастает по большей части хвойная растительность. При этом в южной части Ильмень-Волховского водосбора – минимальные значения испарения с почвы и максимальный валовый первичный продукт (рис. 3, б).

В среднем для исследуемой территории эвапотранспирация за 15 лет (2002–2017 гг.) составляет 0,962 мм/сут, что совпадает с данными, приведенными во Введении, полученными экспериментальным путем. Согласно модели, за исследуемый период наибольшее испарение на территории Ладожского бассейна достигается за счет испарения осадков, перехвачен-

ных растительностью  $E_i$ , и в среднем составляет 0,548 мм/сут, против транспирации растительности и испарения с почвы (средние значения 0,237 и 0,176 мм/сут соответственно). Из рис. 4 видно, что с 2002 по 2017 г. изменений как в общей эвапотранспирации, так и в ее компонентах на всем водосборе Ладожского озера не наблюдается. Линии тренда компонент эвапотранспирации всего водосбора имеют незначительное, около  $10^{-5}$ – $10^{-6}$ , увеличение за исследуемый промежуток времени. Для частных водосборов большинство линий тренда транспирации растительности, испарения с почвы и испарения осадков, перехваченных растительностью, имеет также небольшую положительную динамику. Исключения составляют транспирация растительности на Ильмень-Волховском водосборе и испарения растительностью перехваченных осадков на Сайма-Вуоксинском и собственном Ладожском водосборах, где наблюдается незначительный нисходящий тренд. Но поскольку исследуемые характеристики являются многофакторными, доподлинно нельзя выяснить, какой из климатических, вегетационных и др. факторов ведет к небольшому изменению линий

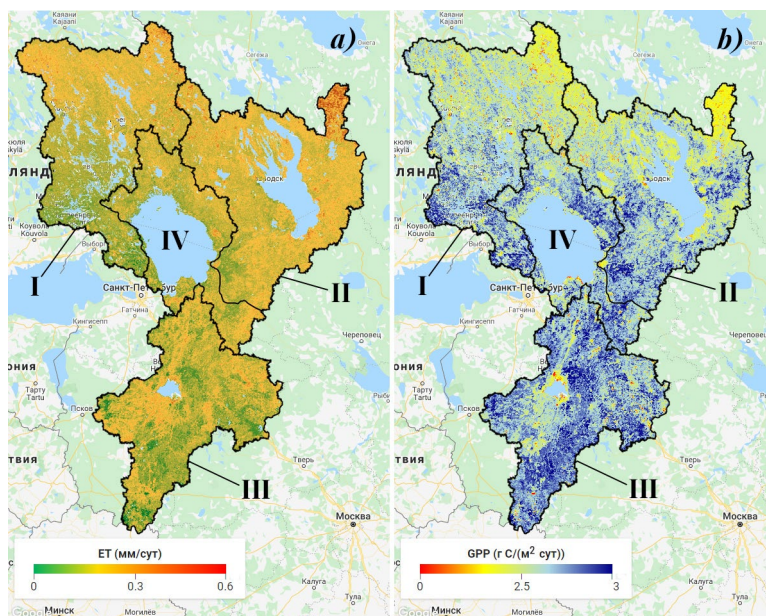


Рис. 3. Карты геопространственного распределения медианных значений эвапотранспирации (a) и валового первичного продукта (b) на Ладожском водосборе с 2002 по 2017 г., рассчитанных по модели PML\_V2

Fig. 3. Maps of the geospatial distribution of the median of evapotranspiration (a) and gross primary product (b) in the Ladoga catchment from 2002 to 2017, calculated using the PML\_V2 model

тренда за исследуемые 15 лет. Следовательно, величины эвапотранспирации и ее компонент с 2002 по 2017 год на исследуемой территории имеют достаточно постоянные средние значения и внутригодовые колебания. Модельные расчеты показывают, что среднее значение валовой первичной продукции на Ладожском водосборе составляет 3,342 г·С/м<sup>2</sup>·сут и оцает-

ся почти постоянным на исследуемой территории за 15 лет. Минимальное среднее значение GPP наблюдается на Сайма-Вуоксинском водосборе, а максимальное среднее – на Ильмень-Волховском (2,984 и 3,704 г·С/м<sup>2</sup>·сут соответственно). На рис. 4 и 5 отчетливо видна сезонная зависимость с максимальными значениями в вегетационный период.

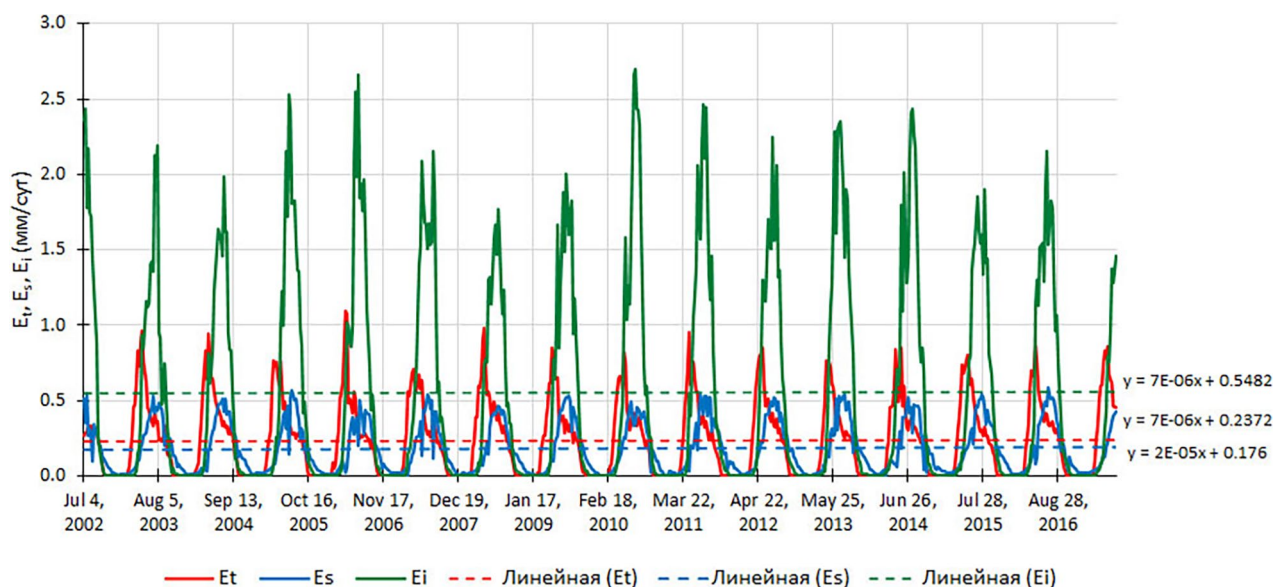


Рис. 4. Динамика компонент эвапотранспирации ( $E_t$ ,  $E_s$ ,  $E_i$ ) по модели PML\_V2 на водосборе Ладожского озера с 4 июля 2002 г. по 27 декабря 2017 г.

Fig. 4. Dynamics of evapotranspiration components ( $E_t$ ,  $E_s$ ,  $E_i$ ) according to the PML\_V2 model in the catchment area of Lake Ladoga from July 04, 2002 to December 27, 2017



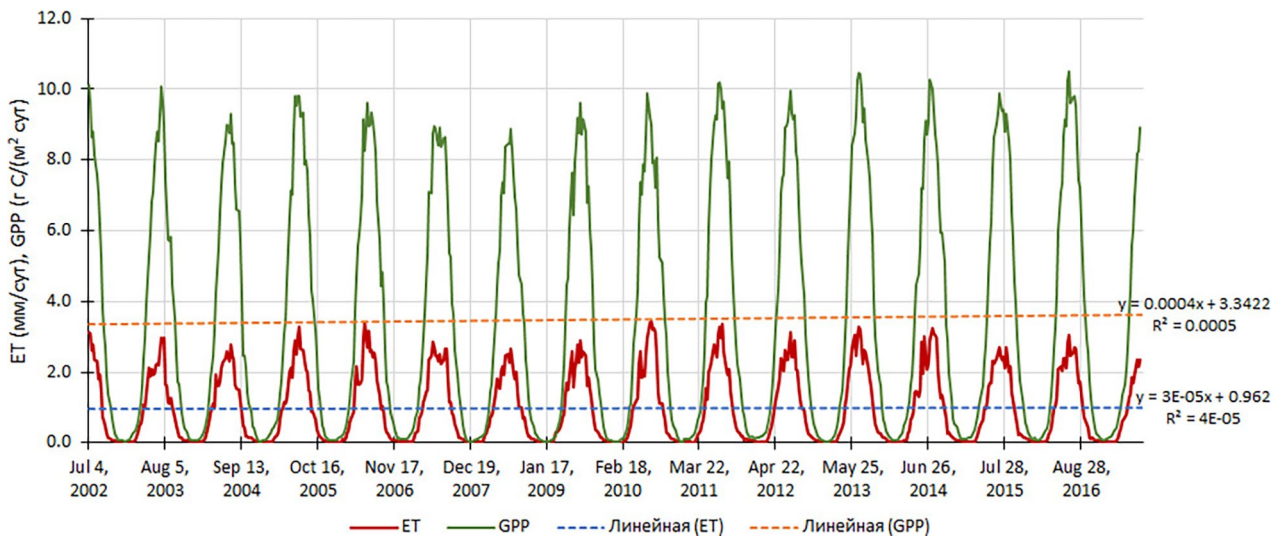


Рис. 5. Динамика эвапотранспирации (ET) и валового первичного продукта (GPP) по модели PML\_V2 на водосборе Ладожского озера с 4 июля 2002 г. по 27 декабря 2017 г.

Fig. 5. Evapotranspiration (ET) and gross primary product (GPP) dynamics according to the PML\_V2 model in the catchment area of Lake Ladoga from July 04, 2002 to December 27, 2017

Территорию Ладожского водосбора по валовой первичной продукции можно отнести к сообществу умеренной продуктивности с  $GPP = 0,684-2,739$  г·С/м<sup>2</sup>·сут [Экология..., 2001]. К этому классу относят основную массу возделываемых сельскохозяйственных культур и кустарники. Согласно [Экология..., 2001], первичная продуктивность тайги составляет 1,365–2,739 г·С/м<sup>2</sup>·сут, для лиственных лесов  $GPP = 2,739-8,217$  г·С/м<sup>2</sup>·сут. В частности, показатели продуктивности ельников для зоны северной тайги – от 1,084 (чернично-зеленомошные) до 1,706 (травные), для зоны средней тайги – от 1,618 (зеленомошные) до 1,947 (черничные), для зоны южной тайги – от 2,482 (зеленомошные) до 4,528 (травные и мохово-травные), для зоны широколиственно-хвойных лесов – от 2,547 (травные и кустарничково-травные) до 3,7 (чернично-зеленомошные) г·С/м<sup>2</sup>·сут [Базилевич, 1993]. Как видно из рис. 5, средние значения валовой первичной продукции составляют 3,342 г·С/м<sup>2</sup>·сут по всему водосбору Ладожского озера по модели PML\_V2. Это значение хорошо согласуется с данными по GPP, приведенными у других авторов. Также известно, что на европейской территории России в зонах достаточного увлажнения первичная продуктивность увеличивается с севера на юг, с увеличением солнечной радиации и продолжительности вегетационного периода. На карте с геопространственным распределением валовой первичной продукции (рис. 3, б) видно аналогичное распределение на территории Ладожского водосбора.

## Заключение

В исследовании проведен расчет эвапотранспирации, ее компонент и валовой первичной продукции на территории бассейна Ладожского озера по модели Пенмана – Монтейта – Леунинга за период с 2002 по 2017 г. В рамках работы написан скрипт в Google Earth Engine для обращения к модели PML\_V2, который в качестве входных данных использовал площадь Ладожского водосбора, полученную на основе цифровой модели рельефа. Выходными данными работы скрипта являются карты геопространственного распределения транспирации растительности, испарения с почвы, испарения осадков, перехваченных растительностью, эвапотранспирация и валовая первичная продукция. Также впервые получена динамика изменения указанных величин за последние 15 лет (с 2002 по 2017 г.), с четко прослеживаемыми максимальными значениями в вегетационный период по модели Пенмана – Монтейта – Леунинга. Отмечено небольшое изменение средних значений эвапотранспирации, ее компонент и валовой первичной продукции за исследуемый период. Карты геопространственного распределения и количественные значения величин хорошо согласуются с данными, приведенными у ряда других авторов [Ладожское..., 2015; Государственный..., 2018], что подтверждает возможность применения модели PML\_V2 для водосбора Ладожского озера.

*Работа выполнена за счет средств федерального бюджета в рамках темы*

№ 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

## Литература

Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

Государственный доклад: О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2017 году. М.: НИИ-Природа, 2018. 298 с.

Исаченко А. Г., Дашкевич З. В., Карнаухова Е. В. Физико-географическое районирование Северо-Запада СССР. Л.: Изд-во ЛГУ, 1965. 248 с.

Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высш. школа, 1991. 366 с.

Кудерский Л. А. Избранные труды. Т. 3. Исследования по ихтиологии, рыбному хозяйству и смежным дисциплинам. М.: КМК, 2013. 528 с.

Ладога. СПб.: Нестор-История, 2013. 560 с.

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья / Под. ред. В. А. Румянцева. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.

Мезенцев В. С., Карнацевич И. В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 168 с.

Черемисинов А. А., Черемисинов А. Ю. Обзор расчетных методов определения суммарного испарения орошаемых сельскохозяйственных полей // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1(21). С. 113–133.

Шаров И. А. Эксплуатация гидромелиоративных систем. М.: Сельхозгиз, 1959. 448 с.

Штойко Д. А. Нормативы проектирования режимов орошения сельскохозяйственных культур и гидромодуля в условиях интенсивного использования орошаемых земель // Орошаемое земледелие в ЕЧ СССР. М.: Колос, 1965. С. 171–185.

Экология: Учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 703 с.

Ball J. T., Woodrow I. E., Berr J. A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions // Progress in Photosynthesis Research. Netherlands: Martinus Nijhoff Publ., 1987. P. 221–224. doi: 10.1007/978-94-017-0519-6\_48

Collatz G. J., Ball J. T., Grivet C., Berry J. A. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer // Agric. For. Meteorol. 1991. Vol. 54. P. 107–136. doi: 10.1016/0168-1923(91)90002-8

Earth Engine API Reference [Электронный ресурс]. URL: [https://developers.google.com/earth-engine/api\\_docs](https://developers.google.com/earth-engine/api_docs) (дата обращения: 05.04.2021).

Gan R., Zhang Y. Q., Shi H., Yang Y. T., Eamus D., Cheng L., Chiew F. H. S., Yu Q. Use of satellite leaf area index estimating evapotranspiration and gross assimilation for Australian ecosystems // Ecohydrology. 2018. Vol. 11. e1974. doi: 10.1002/eco.1974

Gash J. H. C. Analytical model of rainfall interception by forests // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1979. Vol. 105. P. 43–55. doi: 10.1002/qj.49710544304

GitHub [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/gee-hydro/gee\\_PML](https://github.com/gee-hydro/gee_PML) (дата обращения: 05.04.2021).

Leuning R., Zhang Y. Q., Rajaud A., Cleugh H., Tu K. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation // Water Resour. Res. 2008. Vol. 44. W10419. doi: 10.1029/2007WR006562

Monteith J. Evaporation and environment // 19<sup>th</sup> Symposium of the Soc. for Experimental Biol. 1965. Vol. 19. P. 205–234.

Penman H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass // Proc. R. Soc., London (A). 1948. Vol. 193. P. 120–145.

PML\_V2: Coupled Evapotranspiration and Gross Primary Product [Электронный ресурс]. URL: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS\\_IGSNRR\\_PML\\_V2](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS_IGSNRR_PML_V2) (дата обращения: 05.04.2021).

Zhang Y., Kong D., Gan R., Chiew F. H. S., McVicar T. R., Zhang Q., Yang Y. Coupled estimation of 500-m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017 // Remote Sensing of Environ. 2019. Vol. 222. P. 165–182. doi: 10.1016/j.rse.2018.12.031

Zhang Y. Q., Pena-Arancibia J. L., McVicar T. R., Chiew F. H., Vaze J., Liu C., Lu X., Zheng H., Wang Y., Liu Y. Y., Miralles D. G., Pan M. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components // Sci. Rep. 2016. Vol. 6. Art. 19124. doi: 10.1038/srep19124

Поступила в редакцию 23.04.2021

## References

Basilevich N. I. Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii [Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia]. Moscow: Nauka, 1993. 293 p.

Cheremisinov A. A., Cheremisinov A. Yu. Obzor raschetnykh metodov opredeleniya summarnogo ispareniya oroshaemykh sel'skokhozyaistvennykh polei [Overview of settlement methods for determining the total evaporation of irrigated agricultural fields]. Nauch. zhurn. Ross. Nil probl. melioratsii [Sci. J. Russ. Res. Inst. Melioration Probl.]. 2016. No. 1(21). P. 113–133.

Ekologiya: Uchebnik dlya vuzov [Ecology: A university textbook]. Moscow: Uniti-Dana, 2001. 703 p.

Gosudarstvennyi doklad: O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2017 godu [State report: on the status and use of water resources of the Russian Federation in 2017]. Moscow: NIA-Nature, 2018. 298 p.

Isachenko A. G., Dashkevich Z. V., Karnukhova E. V. Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Severo-Zapada SSSR [Physical and geographical zoning of the North-

West of the USSR]. Leningrad: Izd-vo LGU, 1965. 248 p.

*Isachenko A. G.* Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe raionirovanie [Landscape studies and physical and geographical zoning]. Moscow: Vysshaya shkola, 1991. 366 p.

*Kuderskii L. A.* Izbrannye trudy. T. 3. Issledovaniya po ikhtiologii, rybnomu khozyaistvu i smezhnym distsiplinam [Selected works. Vol. 3. Research on ichthyology, fisheries, and related disciplines]. Moscow: KMK, 2013. 528 p.

*Ladoga.* St. Petersburg: Nestor-History, 2013. 560 p.

*Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ya* [Lake Ladoga and the sights of his coast]. St. Petersburg: Nestor-History, 2015. 200 p.

*Mezentsev V. S., Karnatsevich I. V.* Uvlazhnennost' Zapadno-Sibirskoi ravniny [Moisture content of the West Siberian Plain]. Leningrad: Gydrometeoisdat, 1969. 168 p.

*Sharov I. A.* Ekspluatatsiya gidromeliorativnykh sistem [Operation of hydro-reclamation systems]. Moscow: Sel'khozgiz, 1959. 448 p.

*Shoneko D. A.* Normativy proektirovaniya rezhimov orosheniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur i gidromodulya v usloviyakh intensivnogo ispol'zovaniya oroshayemykh zemel' [Standards for designing irrigation regimes of crops and hydromodules in conditions of intensive use of irrigated land]. *Oroshaemoe zemledelie v ECh SSSR* [Irrigated agriculture in the USSR]. Moscow: Kolos, 1965. P. 171–185.

*Ball J. T., Woodro I. E., Berr J. A.* A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. *Progress in Photosynthesis Research*. Martinus Nijhoff Publ., Netherlands, 1987. P. 221–224. doi: 10.1007/978-94-017-0519-6\_48

*Collatz G. J., Ball J. T., Grivet C., Berry J. A.* Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer. *Agric. For. Meteorol.* 1991. Vol. 54. P. 107–136. doi: 10.1016/0168-1923(91)90002-8

*Earth Engine API Reference.* URL: [https://developers.google.com/earth-engine/api\\_docs](https://developers.google.com/earth-engine/api_docs) (accessed: 05.04.2021).

*Gan R., Zhang Y. Q., Shi H., Yang Y. T., Eamus D., Cheng L., Chiew F. H. S., Yu Q.* Use of satellite leaf area index estimating evapotranspiration and gross assimilation for Australian ecosystems. *Ecohydrology*. 2018. Vol. 11. e1974. doi: 10.1002/eco.1974

*Gash J. H. C.* Analytical model of rainfall interception by forests. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1979. Vol. 105. P. 43–55. doi: 10.1002/qj.49710544304

*GitHub.* URL: [https://github.com/gee-hydro/gee\\_PML](https://github.com/gee-hydro/gee_PML) (accessed: 05.04.2021).

*Leuning R., Zhang Y. Q., Rajaud A., Cleugh H., Tu K.* A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. *Water Resour. Res.* 2008. Vol. 44. W10419. doi: 10.1029/2007WR006562

*Monteith J.* Evaporation and environment. *19<sup>th</sup> Symposium of the Soc. for Experimental Biol.* 1965. Vol. 19. P. 205–234.

*Penman H. L.* Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc., London (A)*. 1948. Vol. 193. P. 120–145.

*PML\_V2: Coupled Evapotranspiration and Gross Primary Product.* URL: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS\\_IGSNRR\\_PML\\_V2](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS_IGSNRR_PML_V2) (accessed: 05.04.2021).

*Zhang Y., Kong D., Gan R., Chiew F. H. S., McVicar T. R., Zhang Q., Yang Y.* Coupled estimation of 500-m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017. *Remote Sens. Environ.* 2019. Vol. 222. P. 165–182. doi: 10.1016/j.rse.2018.12.031

*Zhang Y. Q., Pena-Arancibia J. L., McVicar T. R., Chiew F. H., Vaze J., Liu C., Lu X., Zheng H., Wang Y., Liu Y. Y., Miralles D. G., Pan M.* Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Sci. Reports*. 2016. Vol. 6. Art. 19124. doi: 10.1038/srep19124

Received April 23, 2021

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Расулова Анна Мурадовна

научный сотрудник, к. ф. -м. н.  
Институт озераведения РАН – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (ИНОЗ РАН – СПбФИЦ РАН)  
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105  
эл. почта: ARasulova@gmail.com  
тел.: +79582013668

## CONTRIBUTOR:

### Rasulova, Anna

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences  
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia  
e-mail: ARasulova@gmail.com  
tel.: +79582013668