

УДК 631.4(556)

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ИСПАРЕНИЯ, ТРАНСПИРАЦИИ И ЗАПАСОВ ВОДЫ В ПОЧВЕ ПОЛЕЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ЗА БЕЗМОРОЗНЫЙ ПЕРИОД В РАЗЛИЧНЫЕ ПО ВОДНОСТИ ГОДЫ¹

© 2018 г. Н.А. Шумова

Институт водных проблем РАН

Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: shumova_aqua@rambler.ru

Представлен краткий обзор наиболее распространенных методов оценки испарения. Изложена методика и приведена схема расчета суммарного испарения и его составляющих и запасов воды в почве; дано подробное описание параметров информационного обеспечения. Показана динамика декадных величин испарения воды почвой, транспирации и запасов воды в почве полей яровой пшеницы за безморозный период в различные по водности годы в основных зернопроизводящих регионах России. Оценено соотношение между транспирацией и испарением воды почвой за безморозный период в различные по водности годы.

Ключевые слова: яровая пшеница, испарение воды почвой, транспирация, запасы воды в почве, динамика испарения и транспирации, безморозный период.

DOI: 10.24411/ 2542-2006-2018-10009

Состояние сельскохозяйственных культур тесно связано с гидрометеорологическими условиями их произрастания, среди которых наиболее важно суммарное испарение. Его величина представляет собой основную расходную часть водного баланса сельскохозяйственных угодий и наряду с осадками определяет запасы воды в почве, которые оказывают первостепенное влияние на продуктивность агроценозов.

Основные зернопроизводящие регионы России расположены в лесостепной и степной зонах, которые отличаются высоким плодородием в сочетании с обилием света и тепла, что способствовало превращению этой территории в агроландшафт. Вместе с тем эти территории подвержены засухам, что делает актуальной разработку гидрологических основ управления почвенными водами, которые используются недостаточно эффективно. Одно из направлений решения проблемы рационального использования почвенных вод связано с задачей уменьшить испарение воды в период от схода снежного покрова до смыкания посевов и после уборки урожая до наступления зимы. Это время, когда почвенные воды теряются на непродуктивное испарение (испарение воды почвой), которое не участвует в формировании урожая. Уменьшение испарения воды на определенную величину приводит к увеличению транспирации на ту же величину при неизменной величине суммарного испарения. Иными словами, *за счет изменения структуры суммарного испарения, а именно соотношения между испарением воды почвой и транспирацией, повышается водообеспеченность посева.*

Цель настоящей работы – оценка и анализ закономерностей формирования динамики декадных величин испарения воды почвой, транспирации и запасов воды в почве полей яровой пшеницы за безморозный период в различные по водности годы в основных

¹ Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы (НИР) ИВП РАН за 2018-2020 гг. темы 2 «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности» (№ 0147-2018-0002), раздела 2.6. «Эволюция наземных экосистем в изменяющихся природных условиях» № государственной регистрации АААА-А18-118022090104-8».

зернопроизводящих регионах России и выявление резервов возможного повышения транспирации за счет изменения структуры суммарного испарения.

Краткий обзор наиболее распространенных методов оценки испарения

Непосредственные измерения суммарного испарения на сельскохозяйственных полях и угодьях, проводящиеся при использовании испарителей, осуществляются на сети агрометеорологических станций крайне редко. Недостатком этого подхода является ограниченность временем вегетации сельскохозяйственных культур периода наблюдений по испарителям. Кроме того, во многих случаях материалы наблюдений по испарителям содержат существенные систематические ошибки. Поэтому широкое распространение получили расчетные методы определения испарения. В зависимости от задачи исследования или расчета, а также от количества и качества исходных данных выбирается тот или иной метод расчета, оптимальный для конкретных условий.

Метод водного баланса. Материалы наблюдений агрометеорологических станций за осадками и влажностью почвы позволяют оценить величины суммарного испарения по методу водного баланса. Однако в большинстве случаев наблюдения за влажностью почвы проводятся не в течение всего безморозного периода (от схода снежного покрова весной до наступления отрицательных температур воздуха осенью), а только в период вегетации сельскохозяйственных культур. К тому же материалы наблюдений за влажностью почвы содержат существенные случайные ошибки (Шумова, 2003), обусловленные большой пространственной изменчивостью влажности почвы и малым объемом выборки (на сети агрометеорологических станций принята четырехкратная повторность определения влажности почвы). Но несмотря на эти недостатки метод водного баланса является одним из основных для определения испарения с сельскохозяйственных полей, особенно когда имеются надежные данные о запасах воды в почве и осадках.

В лесостепной и степной зонах, где сток дождевых осадков наблюдается редко и пренебрежимо мал по сравнению с годовым стоком, а водообмен между почвенными и грунтовыми водами на сельскохозяйственных полях практически отсутствует, для периода от полного схода снежного покрова и стекания талых вод до наступления отрицательных температур воздуха осенью (безморозный период), как и для отдельных частей безморозного периода, уравнение водного баланса в общем виде можно записать так:

$$E_C = V_H - V_K + P \quad (1),$$

где E_C – суммарное испарение за расчетный период; P – осадки за тот же период; V_H и V_K – запасы воды в почве на начало и конец расчетного периода.

Метод теплового баланса. При детальном исследовании процесса испарения, его суточных величин и внутрисуточного хода используется метод теплового баланса, в основе которого лежит соотношение между приходом и расходом количества тепла деятельной поверхности. При расчете испарения методом теплового баланса используют формулу (Руководство по градиентным ..., 1964):

$$E = \frac{R - B}{L \left(1 + 0.64 \frac{\Delta T}{\Delta e} \right)} \quad (2),$$

где R – радиационный баланс; B – поток тепла в почву; L – скрытая теплота испарения; $\Delta T = (T_{0.5} - T_2)$; $\Delta e = (e_{0.5} - e_2)$; $T_{0.5}$, T_2 , $e_{0.5}$, e_2 – соответственно, температура и влажность воздуха, измеренные на высотах 0.5 и 2 м над поверхностью земли.

Величина радиационного баланса R определяется на актинометрических станциях в соответствии с «Руководством гидрометеорологическим станциям ...» (1957). Поток тепла в

почву V рассчитывается на основе использования данных об изменении температуры почвы с глубиной во времени при известных теплофизических характеристиках почвы (Руководство по градиентным ..., 1964).

Диапазон метеорологических условий, в которых для определения испарения применим метод теплового баланса, несколько ограничен. Формула (2) дает неточные результаты для утренних и вечерних часов, а также и для дневного времени при пасмурной погоде.

Метод турбулентной диффузии позволяет определить часовые, суточные, месячные и годовые величины испарения с любого вида подстилающей поверхности, включая сельскохозяйственные поля небольших размеров. Для расчета величин испарения методом турбулентной диффузии требуются данные градиентных измерений, а именно – скорости ветра, температуры и влажности воздуха как минимум на двух высотах (Руководство по градиентным ..., 1964).

Выражение для расчета испарения (вертикального потока водяного пара) методом турбулентной диффузии при близкой к равновесной стратификации атмосферы имеет вид (Константинов и др., 1971):

$$E = \rho \chi^2 \delta \frac{u_2 - u_1}{\ln(z_2/z_1)} \frac{e_1 - e_2}{z \ln(z_2/z_1)} \quad (3),$$

где ρ – плотность воздуха; χ – постоянная Кармана; δ – размерный коэффициент; u_1 и u_2 – скорость ветра, измеренная на высоте z_1 и z_2 ; e_1 и e_2 – упругость водяного пара, измеренная на высоте z_1 и z_2 ; z_1 и z_2 – высоты над поверхностью земли, на которых измеряются метеорологические элементы при градиентных наблюдениях.

Если атмосферная стратификация отличается от равновесной, то при расчетах вертикального потока водяного пара вводится поправочный коэффициент, характеризующий отличие естественных профилей метеорологических элементов от логарифмических.

Суммы испарения с точностью, соизмеримой с точностью расчета испарения методами водного и теплового баланса, определяются по методу турбулентной диффузии за промежутки не менее 5-10 суток (Струзер, Русин, 1956). Для получения испарения за более короткие промежутки времени требуется значительное увеличение повторности измерений, что делает метод весьма громоздким.

Расчет испарения по данным метеорологических станций. Метод турбулентной диффузии лежит в основе методики расчета испарения по данным метеорологических станций. А.Р. Константинов (1968) установил эмпирические связи градиентов температуры, влажности воздуха и скорости ветра с температурой и влажностью воздуха, измеренными по стандартной методике на высоте 2 м. В результате был построен ряд графиков, на каждом из них представлены кривые, по которым в зависимости от температуры и влажности воздуха, измеренным на высоте 2 м, можно определить величины среднего многолетнего испарения с поверхности суши за год, испарение по месяцам за конкретный год, а также месячные величины испарения воды почвой и снегом (Константинов и др., 1971). Точность данной методики соизмерима с точностью определения испарения по методам водного и теплового баланса.

В основе *расчета испарения по биологическому водопотреблению* (Алпатыев, 1954) лежит связь испарения с определяющими его величинами, которая в символическом виде может быть записана как функция погодных условий $E_{\text{метео}}$, запасов воды в почве V и биологических свойств растений Bio :

$$E = f(E_{\text{метео}}, V, Bio) \quad (4).$$

Для определения оптимального водопотребления сельскохозяйственных культур рекомендуется использовать биологические кривые, представляющие собой отношение суммарного испарения, не лимитированного запасами воды в почве, к сумме среднесуточных

дефицитов влажности воздуха или к сумме среднесуточных температур воздуха (Алпатьев, 1965, 1969). Биологические кривые водопотребления являются устойчивым показателем потребности растений в воде при различных метеорологических условиях.

В основе методики расчета испарения с использованием уравнений связи лежит связь между тепловым и водным режимами отдельных территорий. Наиболее удачное количественное выражение этой связи было предложено Э.М. Ольдекопом (1911):

$$E = E_0 \text{th}(P/E_0) \quad (5),$$

где E – испарение; P – осадки; E_0 – потенциальное испарение при данных метеорологических условиях; th – гиперболический тангенс. Потенциальное испарение принимается пропорциональным дефициту влажности воздуха.

Простота методики делает ее удобной для определения норм испарения с территорий масштаба географической зоны или речного бассейна. В последнее время методика используется для оценок изменения испарения при возможном изменении климата (Бусарова, Гусев, 1995; Novak, 1995; Шумова, 2004).

Комплексный метод расчета испарения основывается на совместном анализе уравнений теплового и водного баланса (Thorntwaite, 1948; Penman, 1956; Philip, 1957; Будаговский, 1964; Monteith, 1965; Будыко, 1971).

В методике, предложенной М.И. Будыко (Будыко, 1971; Зубенко, 1974) рассматриваются две стадии испарения: первая соответствует оптимально увлажненной почве, испарение с которой равно потенциальному испарению, а вторая – недостаточно увлажненной почве с влажностью ниже критической:

$$E = \begin{cases} E_0 & \text{при } W \geq W_0 \\ E_0 \frac{W}{W_0} & \text{при } W < W_0 \end{cases} \quad (6),$$

где E – фактическое испарение; E_0 – потенциальное испарение; W – продуктивная влажность активного для растений слоя почвы; W_0 – критическое значение продуктивной влажности почвы, при котором и выше которого испарение равно потенциальному испарению.

Влажность почвы на конец месяца вычисляется:

$$W_2 = \begin{cases} W_1 + P_{\text{мес}} - Y_{\text{реч}} - E_0 & \text{при } W \geq W_0 \\ \frac{1}{1 + \frac{E_0}{2W_0}} \left[W_1 \left(1 - \frac{E_0}{2W_0} \right) + P_{\text{мес}} - Y_{\text{реч}} \right] & \text{при } W < W_0 \end{cases} \quad (7),$$

где $P_{\text{мес}}$ – средние многолетние месячные суммы осадков; $Y_{\text{реч}}$ – средний многолетний речной сток; W_1 и W_2 – продуктивная влажность активного для растений слоя почвы на начало и конец месяца соответственно.

Месячные нормы осадков определяются из справочников по климату. Средние многолетние величины стока приводятся в монографиях по ресурсам поверхностных вод. Месячная величина потенциального испарения вычисляется в зависимости от дефицита влажности воздуха по эмпирическим графикам, построенным для различных геоботанических зон. Критическая продуктивная влажность почвы W_0 (средняя за месяц) определяется в зависимости от природной зоны и средней многолетней месячной температуры воздуха, которая приводится в справочниках по климату. Значение запасов воды в почве для первого расчетного месяца W_1 определяется по карте С.А. Вериги и Л.А. Разумовой (1973). Запасы воды в почве, вычисленные для конца предыдущего месяца, принимаются за начальные для следующего месяца.

В основе *тепловоднобалансового метода расчета суммарного испарения* с сельскохозяйственных полей, предложенного С.И. Харченко (1975), лежат уравнения теплового и водного балансов с учетом элементов вертикального водообмена в зоне аэрации, а также биологические особенности развития растений. С.И. Харченко приводит общее выражение для расчета суммарного испарения, а также рассматривает два частных случая. Первый – испарение при глубоком залегании грунтовых вод, когда можно пренебречь водообменом с лежащими ниже горизонтами и при отсутствии поверхностного стока. Во втором случае рассматриваются условия достаточного увлажнения почвы.

Эксперты из Организации объединенных наций по продовольствию и сельскому хозяйству (Food and Agriculture Organization of the United Nations) предлагают рассчитывать потенциальное и фактическое испарение по метеорологическим данным и коэффициенту посева (Allen et al., 1998). Этот метод можно назвать *методом FAO* (Food and Agriculture Organization). Потенциальное испарение в данном случае рассчитывается по методу Пенмана-Монтейта (Penman, 1948; Monteith, 1965, 1985), который был разработан для признанного универсальным гипотетического растительного покрова, представляющего собой сомкнутый хорошо увлажненный зеленый травяной покров высотой 0.12 м. При этом отмечается, что само понятие «потенциальное испарение» (potential evapotranspiration) несет в себе некоторую неопределенность, и предлагается заменить термин “potential evapotranspiration” на “reference evapotranspiration” – это испарение с гипотетического хорошо развитого зеленого покрова высотой 0.12 м, с полностью увлажненной почвы.

Уравнение Пенмана-Монтейта (Allen et al., 1998) в принятых в настоящей статье обозначениях записывается в виде:

$$ET_o = \frac{0.408\phi(R - B) + \gamma \frac{900}{T + 273} ud}{\phi + \gamma(1 + 0.34u)} \quad (8),$$

где ET_o – потенциальное испарение, мм сут⁻¹; ϕ – производная насыщающей упругости водяного пара от температуры воздуха, кПа °C⁻¹; R – радиационный баланс, МДж м⁻² сут⁻¹; B – поток тепла в почву, МДж м⁻² сут⁻¹; γ – психрометрическая константа, кПа °C⁻¹; T – средняя суточная температура воздуха, °C; u – средняя суточная скорость ветра на высоте 2 м, м сек⁻¹; d – дефицит влажности воздуха, кПа.

Производная насыщающей упругости водяного пара от температуры воздуха ϕ определяется по соотношению:

$$\phi = \frac{4098 \left[0.6108 \dot{a} \dot{d} \left(\frac{17.27 \dot{D}}{\dot{D} + 237.3} \right) \right]}{(\dot{D} + 237.3)^2} \quad (9),$$

Психрометрическая константа γ определяется как:

$$\gamma = \frac{c_p P_{\text{атм}}}{\varepsilon L} \quad (10),$$

где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, кПа; L – скрытая теплота парообразования, 2.45 МДж кг⁻¹; c_p – теплоемкость при постоянном давлении, 1.013•10⁻³ МДж кг⁻¹ °C⁻¹; $\varepsilon=0.622$ – отношение молекулярного веса водяного пара к весу сухого воздуха.

Атмосферное давление рассчитывается в зависимости от высоты места по соотношению:

$$P_{\text{атм}} = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (11),$$

где z – высота над уровнем моря, м.

Как следует из (10) и (11), величина психрометрической константы γ практически

определяется высотой местности и для лесостепной и степной зон европейской территории России может изменяться в пределах 0.067-0.065 (при высоте местности от 0 до 300 м н.у.м. БС).

Расчет проводится по месячным интервалам времени с учетом, что в месяце все метеорологические элементы каждые сутки одни и те же. Рассчитанные по формуле (8) величины потенциального испарения умножаются на число суток в месяце.

В условиях оптимального увлажнения почвы и хорошо развитого растительного покрова испарение посева ET_C , согласно методу ФАО (Allen et al., 1998), определяется по соотношению:

$$ET_C = K_C ET_0 \quad (12),$$

где K_C – коэффициент посева, значения которого определяются по таблице в зависимости от возделываемой культуры и стадии развития растений.

В случае уменьшения запасов воды в корнеобитаемом слое почвы (водный стресс) уравнение (12) приобретает вид:

$$ET_C = K_C K_S ET_0 \quad (13),$$

где K_S – коэффициент водного стресса, определяемый на основе значений продуктивных запасов воды в корнеобитаемом слое почвы.

Метод ФАО, разработанный для оценки потенциального и фактического испарения, по сути близок к биологическому методу расчета потребности растений в воде, предложенному А.М. Алпатьевым (1954). Основное отличие заключается в том, что потенциальное испарение А.М. Алпатьев определяет по дефициту влажности воздуха или его температуре.

К комплексному методу можно отнести не получивший широкого распространения, но обладающий несомненными достоинствами метод расчета суммарного испарения и его составляющих (испарения воды почвой и транспирации) и запасов воды в почве, предложенный А.И. Будаговским (1964). Автор рассматривает суммарное испарение (для безморозного периода – от полного схода снежного покрова весной до наступления отрицательных температур воздуха осенью) как цепь взаимосвязанных процессов передвижения воды и водяного пара в системе почва-растение-атмосфера и использует для их описания систему из шести уравнений, в том числе описывающих: вертикальный перенос влаги в растительном покрове; вертикальный перенос тепла в растительном покрове; вертикальное приращение потоков влаги; вертикальное приращение потоков тепла; уравнение теплового баланса и формулу Магнуса, описывающую связь между температурой листа и влажностью воздуха внутри него.

В настоящей работе для оценки режима испарения с полей яровой пшеницы за безморозный период используется именно этот метод (Будаговский, 1964), так как он позволяет оценить не только суммарное испарение, но и его составляющие (испарение воды почвой и транспирацию) на основе использования материалов стандартных наблюдений метеорологических, актинометрических и агрометеорологических станций.

Метод расчета

Суммарное испарение E_C в общем случае включает в себя испарение воды почвой E_{II} и транспирацию E_T и определяется по соотношению:

$$E_C = E_{II} + E_T \quad (14).$$

Испарение воды почвой E_{II} определяется по эмпирической формуле (Будаговский, Шумова, 1976):

$$E_{II} = E_{II0} (\gamma V e^{-P/E_{II0}} + 1 - e^{-P/E_{II0}}) \quad (15),$$

$$E_{II0} = b_1 \Phi_{II} D_{II} d + b_2 (Re^{-s\omega} - B) \quad (16),$$

$$\Phi_{II} = e^{-1.1\omega} \quad (17),$$

$$D_{II} = \frac{0.8u}{u^{1/2} + 0.7} \quad (18),$$

$$b_1 = \frac{0.7}{1 + 1.56\varphi}, \quad b_2 = \frac{0.026\varphi}{1 + 1.56\varphi}, \quad \varphi = \frac{24513}{(235 + T)^2} e^{\frac{17.1T}{235+T}} \quad (19),$$

где E_{II} – потенциальное испарение воды почвой (испарение со смоченной поверхности почвы); γ – эмпирический параметр, зависящий от водно-физических свойств почвы; V – запасы воды в расчетном слое почвы; P – атмосферные осадки; b_1 и b_2 – функции температуры воздуха; Φ_{II} – функция относительной площади листьев; D_{II} – функция скорости ветра; d – дефицит влажности воздуха; R – радиационный баланс; S – коэффициент, зависящий от географической широты и времени года; ω – относительная площадь листьев; B – поток тепла в почву; u – скорость ветра; φ – производная насыщающей упругости водяного пара от температуры воздуха T .

Транспирация E_T определяется следующим образом (Будаговский, Шумова, 1976):

$$E_T = \begin{cases} E_{TO} & \text{при } V \geq V_{кр} \\ E_{TO} \frac{V}{V_{кр}} & \text{при } V < V_{кр} \end{cases} \quad (20),$$

$$E_{TO} = b_1 D_{\omega} \Phi_1 d + b_2 [R(1 - \Phi_2 e^{-s\omega}) - (1 - \Phi_2)B] - (1 - \Phi_2)E_{II} \quad (21),$$

$$V_{кр} = 60 + 4.2E_O \quad (22),$$

$$E_O = b_1 D_{\omega} \Phi_1 d + b_2 (R - B) \quad (23),$$

$$D_{\omega} = \frac{c_1 \tilde{u}}{c_2 \tilde{u}^{1/2} + 1}, \quad \tilde{u} = u + 0.4 \quad (24),$$

$$\Phi_1 = (1 - e^{-\omega}), \quad \Phi_2 = e^{-0.25\omega} \quad (25),$$

где $V_{кр}$ – критические запасы воды в почве, E_O – потенциальное испарение (при $\omega \rightarrow \infty$); D_{ω} и \tilde{u} – функции скорости ветра; Φ_1 и Φ_2 – функции относительной площади листьев; c_1 и c_2 – эмпирические коэффициенты.

Испарение при отсутствии растительного покрова рассматривается в качестве частного случая суммарного испарения.

Расчет запасов воды в почве по интервалам времени τ производится по формуле (Будаговский, Шумова, 1976):

$$V_{\kappa} = (V_n + k/m)e^{-m\tau} - k/m \quad (26),$$

где V_n и V_{κ} – запасы воды в почве в начале и конце расчетного интервала времени τ соответственно. При $V_n \geq V_{кр}$ k и m определяются по соотношениям:

$$k = b_1 D_{\omega} \Phi_1 d + b_2 [R(1 - \Phi_2 e^{-s\omega}) - (1 - \Phi_2)B] + \Phi_2 (1 - e^{-P/E_{II}}) E_{II} - P \quad (27),$$

$$m = \Phi_2 \gamma E_{II} e^{-P/E_{II}} \quad (28).$$

При $V_n < V_{кр}$ они принимают вид:

$$k = (1 - e^{-P/E_{II}}) E_{II} - P \quad (29),$$

$$m = \frac{1}{V_{кр}} \{ b_1 D_{\omega} \Phi_1 d + b_2 R(1 - \Phi_2 e^{-s\omega}) - (1 - \Phi_2) [(1 - e^{-P/E_{II}}) E_{II} + b_2 B] \} + \gamma E_{II} e^{-P/E_{II}} \quad (30).$$

Если переход продуктивных запасов воды в почве через критические значения происходит внутри интервала времени τ , то отвечающее ему время $\tau_{кр}$ вычисляется из

формулы (26) при условии $V_k=V_{кр}$, где $V_{кр}$ – критические запасы воды в почве:

$$\tau_{кр} = \frac{I}{m} \ln \frac{V_n + \frac{k}{m}}{V_{кр} + \frac{k}{m}} \quad (31).$$

В соответствии с найденным значением $\tau_{кр}$ декада делится на две в общем случае неравные части.

Основные параметры описанной схемы расчета универсальны, то есть могут быть использованы для расчетов динамики суммарного испарения и продуктивных запасов воды в почве в разных физико-географических зонах. По этой схеме можно также оценить полные запасы воды в почве, включающие как продуктивную составляющую запасов воды в почве (полезную для растений), так и недоступную для растений воду (связанную).

Выполненное сравнение рассчитанных и измеренных на агрометеорологических станциях продуктивных запасов воды в метровом слое почвы, а также сравнение значений испарения, полученных по приведенным выше зависимостям и по методу водного баланса, показало, что метод обладает достаточной точностью и может быть использован для расчетов суммарного испарения и запасов воды в почве сельскохозяйственных полей (Шумова, 2003).

Информационное обеспечение

В основе расчетов испарения и запасов воды в почве по приведенной выше методике лежат материалы наблюдений метеорологических, актинометрических и агрометеорологических станций за температурой и дефицитом влажности воздуха, скоростью ветра, радиационным балансом, осадками без поправок к показаниям осадкомера и биофизическими параметрами растительного покрова (высотой и густотой посева в основные фазы развития растений). Необходимо также иметь сведения о годовой амплитуде температуры воздуха, широте расположения станции и высоте флюгера. Расчет проводится по декадным временным интервалам за период от полного схода снежного покрова весной до наступления отрицательных температур воздуха осенью (безморозный период). Следовательно, и исходные данные должны охватывать этот период.

В расчетах суммарного испарения используются измеренные на актинометрических станциях величины радиационного баланса. Измерения радиационного баланса проводятся над поверхностью типичного для данного региона травяного растительного покрова, но их результаты близки к величинам радиационного баланса посевов зерновых культур. Различия в альбедо между наблюдательными участками и посевами зерновых культур (в частности яровой пшеницы), которые могут привести к ошибкам величин радиационного баланса, незначительны. Величина альбедо посевов яровой пшеницы, по данным разных авторов (Гальперин, 1949; Гаевский, 1953; Русин, 1958; Данилова, 1965), за период с мая по август изменяется от 10 до 26%. Величина альбедо на наблюдательных участках исследуемых метеостанций за тот же период составила 14-26% при среднем значении 19% и среднем квадратическом отклонении в 2%.

Скорость ветра на метеорологических станциях измеряется флюгером, который устанавливается на высотах от 9 до 18 м. Поэтому его показания необходимо привести к принятой при построении расчетных формул высоте 2 м, для чего принят логарифмический закон изменения метеорологических элементов в приземном слое воздуха по высоте, из

которого вытекает соотношение: $u_2 = \frac{\lg(z_2/z_0)}{\lg(h_\phi/z_0)} u_\phi$ (32),

где u_2 и u_ϕ – скорости ветра на высоте z_2 и на высоте флюгера h_ϕ соответственно; z_2 – высота стандартных метеорологических наблюдений 2 м; z_0 – коэффициент шероховатости, зависящий от характера подстилающей поверхности (Константинов и др., 1971).

При приведении скорости ветра к высоте 2 м было принято, что коэффициент шероховатости для месяцев с апреля по октябрь (теплый период, естественный растительный покров) равен 0.05 м, коэффициент шероховатости для месяцев с ноября по март (холодный период, оголенная почва) равен 0.01 м.

Величина параметра s , входящего в соотношения (16) и (21), зависит от высоты Солнца и определяется по широте места в зависимости от времени года по таблице 1.

Таблица 1. Значения параметра s в уравнениях 16 и 22 (Будаговский, 1964).

Table 1. Parameter S values in the equations 16 and 22 (Будаговский, 1964).

Широта, градусы	Месяцы					
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
65	0.41	0.35	0.33	0.34	0.38	0.50
60	0.38	0.33	0.32	0.33	0.35	0.44
55	0.36	0.32	0.31	0.32	0.34	0.40
50	0.34	0.32	0.31	0.32	0.33	0.38
45	0.33	0.31	0.31	0.31	0.32	0.36
40	0.32	0.31	0.31	0.31	0.32	0.34
35	0.32	0.31	0.30	0.31	0.31	0.33

В расчетные зависимости входит величина потока тепла в почву B , которая значительно меньше величины радиационного баланса. Наблюдения за температурой почвы по глубине, необходимые для расчета потока тепла в почву, нестандартные, поэтому рассчитать B не всегда представляется возможным. В данном случае при расчетах испарения использованы приближенные значения потока тепла в почву, полученные из таблицы 2, в зависимости от времени года и годовой амплитудой средней месячной температуры воздуха, составленной А.И. Будаговским (1964) на основе данных М.И. Будыко (1956).

Следует отметить, что величина потока тепла в почву отличается большой пространственной изменчивостью, зависящей от соответствующей изменчивости теплофизических свойств и влажности почвы. Поэтому даже на сравнительно небольшой территории значения потока тепла в почву в разных точках могут быть различны, и приведенные в таблице 2 данные могут характеризовать лишь средние условия. Однако для вегетационного периода ошибка определения потока тепла в почву мала по сравнению с величиной радиационного баланса. В связи с этим при расчетах испарения можно ограничиться приближенными значениями потока тепла в почву.

В формулу для расчета испарения воды почвой (15) входит эмпирический параметр γ , зависящий от характера выпадения осадков и водно-физических свойств почвы. Эти характеристики в модели суммарного испарения не задаются, поэтому удобнее воспользоваться типичным значением параметра γ , которое лежит в пределах от 0.0020 до 0.0030 и имеет размерность мм^{-1} (Будаговский, 1981). Параметр γ оценивается на основе данных наблюдений за влажностью почвы на пару, а также материалов наблюдений агрометеорологических и актинометрических станций.

Проведенные оценки показывают, что для всех четырех станций, материалы которых используются в настоящей работе, значения параметра γ довольно близки и его можно

принять равным 0.0020 мм^{-1} . На первый взгляд может показаться странным, что значения параметра γ , учитывающего свойства почвогрунтов, для разных районов лесостепной и степной зон одни и те же. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что почвы исследуемого региона отличаются генетической однородностью и близким гранулометрическим (средне- и тяжелосуглинистые) составом.

Таблица 2. Значения потока тепла в почву B , кал/(см^2 сут). **Table 2.** Values of warmth flowing into the soil B , cal/(cm^2 per day).

Месяц	Годовая амплитуда температуры воздуха, °С								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Январь	-7	-11	-14	-18	-21	-24	-28	-32	-35
Февраль	-4	-7	-9	-12	-14	-16	-18	-21	-23
Март	2	4	5	6	7	8	10	11	12
Апрель	4	7	9	12	14	16	18	21	23
Май	7	11	14	18	21	24	28	32	35
Июнь	7	11	14	18	21	24	28	32	35
Июль	6	9	11	14	18	20	23	27	29
Август	4	6	7	9	11	13	14	17	18
Сентябрь	-2	-4	-5	-6	-7	-8	-10	-11	-12
Октябрь	-4	-6	-7	-9	-11	-13	-15	-17	-18
Ноябрь	-6	-9	-11	-14	-18	-20	-23	-27	-29
Декабрь	-7	-11	-14	-18	-21	-24	-28	-32	-35

В расчетные зависимости входит биометрический параметр растительного покрова – относительная площадь листьев ω . Относительная площадь листьев является одной из важнейших характеристик растительного покрова, которая изменяется в течение вегетационного периода практически непрерывно (Ничипорович, 1956, 1961). Это величина эффективной поверхности растительного покрова на единице площади посева. Эффективная поверхность растительного покрова включает площадь листьев, продольного сечения стеблей и колосьев. На сети агрометеорологических станций наблюдения за относительной площадью листьев не проводятся, а состояние растительного покрова отмечается средней высотой и густотой в основные фазы развития растений (Руководство по контролю ..., 1955).

Существует детальная методика исследований биометрической структуры растительного покрова (Росс, 1975), которая позволяет получить довольно полную информацию, включающую характеристики пространственной ориентации листьев. Однако к точности сведений об относительной площади листьев, необходимой для расчетов испарения по приведенным выше формулам, не предъявляется особо высоких требований (Шумова, 1994). Поэтому можно ограничиться простейшими методами биометрических исследований. Эти методы основаны на экспериментально установленном факте наличия связи между площадью листьев отдельного растения и его высотой для ряда зерновых и технических сельскохозяйственных культур (Чирков, 1965; Савина, 1966; Самарина, 1969; Тертерян, 1971; Минаева, 1975). Подходы к оценке относительной площади листьев подробно изложены в работе Н.А. Шумовой (2017).

В основе построения зависимостей площади листьев от высоты растений лежат материалы измерений биометрических параметров растений. Площадь листьев определяется по формуле (Росс, 1975):

$$\omega_p = k_n \sum_{i=1}^n (l_i b_i) + \frac{d_1 + d_2}{2} h_c + l_k d_k \quad (33),$$

где ω_p – площадь листьев отдельного растения; n – число листьев в растении; l_i и b_i – длина и максимальная ширина листа соответственно; k_n – коэффициент, позволяющий перейти от произведения длины и максимальной ширины листа к его площади; d_1 и d_2 – диаметр стебля у основания и верхушки соответственно; h_c – длина стебля; l_k и d_k – длина и диаметр колоса соответственно.

Зависимости площади листьев растений от их высоты не являются универсальными для различных зерновых и технических сельскохозяйственных культур, но в то же время довольно хорошо аппроксимируются степенной функцией (Самарина, 1969):

$$\omega_p = a_p h_p^g \quad (34),$$

где ω_p – площадь листьев отдельного растения, см²; h_p – высота растения по вытянутому листу, см; a_p и g – параметры, определяемые по результатам биометрических измерений.

Значения параметра a_p для яровой пшеницы приведены в таблице 3, параметр g в формуле (34) может быть принят равным 1.5. Таблица 3 составлена по результатам обработки биометрических измерений, выполненных на посевах яровой пшеницы в Целиноградской области в 1971 году и в Куйбышевской области в 1974 году (Бусарова, Шумова, 1987). Из таблицы 3 видно, что у растений яровой пшеницы, габитус которой существенно изменяется в течение вегетационного периода, величина a_p довольно существенно различается по фазам развития.

Таблица 3. Значение параметра a_p в уравнении (34) для яровой пшеницы (Бусарова, Шумова, 1987). **Table 3.** Values of a_p in the equation (34) for spring wheat (Бусарова, Шумова, 1987).

Фаза развития	a_p
Кущение	0.15
Выход в трубку	0.18
Колошение	0.12
Цветение	0.09
Молочная спелость	0.08
Восковая спелость	0.07
Уборка	0.05

Таким образом, по данным агрометеорологических станций о высоте растений в основные фазы развития, по соотношению (34) определяется площадь листьев отдельного растения.

Относительная площадь листьев посева определяется из соотношения:

$$\omega = \frac{\omega_p n_p}{S_n} \quad (35),$$

где ω – относительная площадь листьев посева; n_p – число растений на площади посева S_n . Следовательно, зная фазу развития, среднюю высоту и густоту растений, можно определить относительную площадь листьев посева.

Максимальные значения относительной площади листьев могут заметно различаться для полей, занятых одной и той же культурой, что связано, как правило, с погодными условиями и применяемой агротехникой. Так, например, в момент кущения зерновых засуха может

резко (в несколько раз) уменьшить величину относительной площади листьев. Влияние агротехники еще сильнее. В одном и том же регионе одновременно можно обнаружить поля с яровой пшеницей, где максимальное значение относительной площади листьев изменяется от 1 до 10. Однако при грамотном применении агротехнических приемов этот диапазон значительно сужается до 3-4.

Техника расчетов испарения и запасов воды в почве

Расчет проводится по декадным интервалам времени с начала первой декады после схода снежного покрова весной до конца последней декады с положительной температурой воздуха осенью. Если в зимнее время в среднем за декаду отрицательные температуры воздуха не наблюдаются, расчет проводится за календарный год. В принципе методика позволяет проводить расчеты при любом временном шаге, например, по суткам или месяцам. Внутри декады все исходные величины принимаются постоянными, а именно, в любые сутки данной декады одна и та же температура воздуха, скорость ветра, суммарная радиация, осадки и т.д.

Расчет ведется с начальных продуктивных запасов воды в почве. По соотношению (26) находятся продуктивные запасы воды в почве на конец этой декады, которые в свою очередь являются начальными для следующего интервала времени. Начальные запасы воды в почве определяются в зависимости от конкретных условий задачи. В лесостепной и степной зонах за них принимаются первые измеренные величины запасов на агрометеорологических станциях. Как правило, они не совпадают с началом первой декады после полного схода снежного покрова и приходятся на более поздние декады. Для определения продуктивных запасов воды в период между полным сходом снежного покрова и временем первого измерения запасов на агрометеорологической станции проводится расчет «назад», когда в уравнении (26) время (число суток) τ принимает отрицательные значения.

Обычно величины начальных (первых измеренных) продуктивных запасов воды в почве выше их критических значений. Поэтому при расчетах по зависимости (26) параметры k и m определяются согласно (27) и (28) соответственно. Когда продуктивные запасы воды в почве снижаются до критических значений, которые определяются по соотношению (22), параметры k и m в формуле (26) принимаются согласно (29) и (30).

Время наступления критического значения продуктивных запасов воды в почве $\tau_{кр}$, как правило, не совпадает с началом или концом декады. Оно определяется по соотношению (31). В соответствии с найденным значением $\tau_{кр}$ декада делится на две в общем случае неравные части.

Суммарное испарение рассчитывается по формуле (14), то есть складывается из транспирации, определяемой по зависимости (20), и испарения воды почвой, определяемого по соотношениям (15). Продуктивные запасы воды в почве в уравнении (15) принимаются средними для расчетного интервала времени и определяются как:

$$V = \frac{V_n + V_k}{2} \quad (36),$$

где V_n и V_k – продуктивные запасы воды в почве в начале и конце расчетной декады.

Полученные результаты и их анализ

Для оценки суммарного испарения и запасов воды в почве полей яровой пшеницы использованы материалы наблюдений метеорологических станций Безенчук (Самарская область), Ершов (Саратовская область), Каменная Степь (Воронежская область) и Гигант (Ростовская область), расположенных в основных зернопроизводящих регионах европейской

территории России и отражающих многообразие природных условий лесостепной и степной зон. Каждая из этих станций представлена четырьмя различными по водности годами: средние многолетние значения испарения (посчитаны по средним многолетним значениям метеорологических элементов); конкретный год, величина суммарного испарения за безморозный период которого равна или близка значению суммарного испарения среднего многолетнего года – средний; год, когда наблюдается самая большая величина суммарного испарения за весь исследуемый период – многоводный; год, когда наблюдается минимальная величина суммарного испарения за весь исследуемый ряд лет – маловодный (табл. 4). Как видно из таблицы 4, для исследуемых станций годы пониженной и повышенной водности не наступают одновременно, что обусловлено особенностями условий формирования составляющих водного баланса сельскохозяйственных полей.

Таблица 4. Основные характеристики лет, материалы наблюдений по которым используются для оценки внутригодовой динамики суммарного испарения и запасов воды в почве. **Table 4.** The main characteristics of the research years, the materials of which were used to evaluate the annual dynamics of total soil evaporation and water reserve in the soils.

Год	Характеристика года	Продолжительность безморозного периода	V_n , мм	E_c , мм	$E_{п}$, мм	E_t , мм
Безенчук						
–	средний многолетний	апрель (2) – октябрь (2)	147	350	209	141
1970	средний	апрель (1) – октябрь (3)	118	337	227	110
1973	многоводный	март(3) – ноябрь(1)	167	435	232	203
1955	маловодный	апрель (2) – октябрь (3)	123	243	145	98
Ершов						
–	средний многолетний	апрель (2) – октябрь (2)	122	314	188	126
1960	средний	апрель (1) – октябрь (3)	143	296	184	112
1952	многоводный	апрель (2) – ноябрь(1)	203	444	256	188
1972	маловодный	апрель (1) – ноябрь (1)	36	141	103	38
Каменная Степь						
–	средний многолетний	апрель (1) – октябрь (2)	166	421	237	185
1972	средний	апрель (1) – ноябрь (2)	143	386	205	180
1955	многоводный	апрель (1) – ноябрь (1)	256	461	218	244
1954	маловодный	апрель (1) – ноябрь (2)	49	278	202	76
Гигант						
–	средний многолетний	апрель (1) – ноябрь (1)	150	399	226	174
1963	средний	март(3) – ноябрь(3)	121	407	204	203
1974	многоводный	март(1) – декабрь(3)	154	534	330	203
1966	маловодный	февраль(3) – декабрь(1)	124	330	177	152

Примечания к таблице 4: V_n – продуктивные запасы воды в метровом слое почвы в первую декаду безморозного периода; E_c – суммарное испарение, $E_{п}$ – испарение воды почвой, E_t – транспирация за безморозный период; в скобках указан номер декады. **Notes to table 4:** V_n – productive water reserve in the one-meter-deep of soil layer in the first decade of the frost-free period; E_c – total evaporation, $E_{п}$ – soil evaporation, E_t – transpiration during the frosty period; the number of decade is shown in the brackets.

Выбор различных по водности лет производился из рядов наблюдений станций Безенчук, Ершов и Гигант продолжительностью 24 года (1952-1975 гг.); для Каменной Степи – 22 года (1954-1975 гг.). Указанные периоды полностью обеспечены материалами наблюдений, необходимыми для расчетов испарения и запасов воды в почве. Источниками получения исходников послужили метеорологические и актинометрические ежемесячники и сельскохозяйственные таблицы ТСХ (таблицы сельскохозяйственные).

Заметим, что наиболее репрезентативные результаты оценки межгодовой изменчивости дает использование данных тридцатилетних наблюдений за 1951-1980 гг. (Carter et al., 1992). Этот ряд включает в себя влажный, сухой, теплый и холодный периоды. Однако, как показал анализ полученных материалов, в данном случае использование рядов в 24 и даже 22 года не должно привести к заметным ошибкам в полученных оценках.

В данной работе расчеты суммарного испарения и продуктивных запасов воды в метровом слое почвы проведены для полей яровой пшеницы при максимальном значении относительной площади листьев $\omega_{\max}=3$. Расчеты выполнены за период от полного схода снежного покрова весной до наступления отрицательных температур воздуха осенью (за безморозный период) с декадным временным шагом.

На рисунках 1-4 представлен внутригодовой ход суммарного испарения и его составляющих, а также запасов воды в почве полей яровой пшеницы для метеорологических станций Безенчук, Ершов, Каменная Степь и Гигант, каждая из которых представлена четырьмя различающимися по величине суммарного испарения годами.

Анализируя средний многолетний внутригодовой ход суммарного испарения и его составляющих для указанных метеорологических станций, можно отметить следующее. В течение года существенно изменяются как величина суммарного испарения, так и его структура. До появления всходов суммарное испарение представлено только испарением воды почвой. В последней декаде апреля – первой декаде мая появляются всходы яровой пшеницы и суммарное испарение складывается из испарения воды почвой и транспирации. Однако в это время растительный покров развит слабо и поглощает только незначительную часть радиации, отсюда вклад транспирации в суммарное испарение весьма мал. Испарение воды почвой в этот период не меняется или очень медленно продолжает возрастать. Со второй-третьей декады мая снижается испарение воды и быстро возрастает транспирация, во второй-третьей же декаде мая транспирация уже превышает испарение воды почвой.

Средние многолетние декадные значения суммарного испарения достигают максимума в третьей декаде мая – первой декаде июня и лежат в пределах от 40 мм в декаду (Ершов) до 54 мм в декаду (Каменная Степь); максимум транспирации обычно совпадает с максимумом суммарного испарения и составляет 28-40 мм в декаду соответственно. Испарение воды продолжает убывать до третьей декады июня, после чего оно начинает несколько возрастать или остается на одном и том же уровне; максимальные декадные значения испарения воды почвой приходятся на начальные декады весной и могут составить 15-19 мм в декаду.

До третьей декады июля транспирация превышает испарение воды почвой, а затем становится несколько ниже последнего. После уборки урожая испарение представлено только испарением воды почвой, величина которого медленно убывает.

Средние многолетние значения суммарного испарения и его составляющие (испарение воды почвой и транспирация) в течение безморозного периода изменяются плавно, без каких либо резких скачков.

Рассматривая внутригодовую изменчивость средних многолетних значений запасов воды в метровом слое почвы, можно отметить, что с момента схода снежного покрова до появления всходов в мае запасы воды довольно высоки, их максимальные значения могут достигать 122-166 мм, а их уменьшение в этот период происходит медленно.

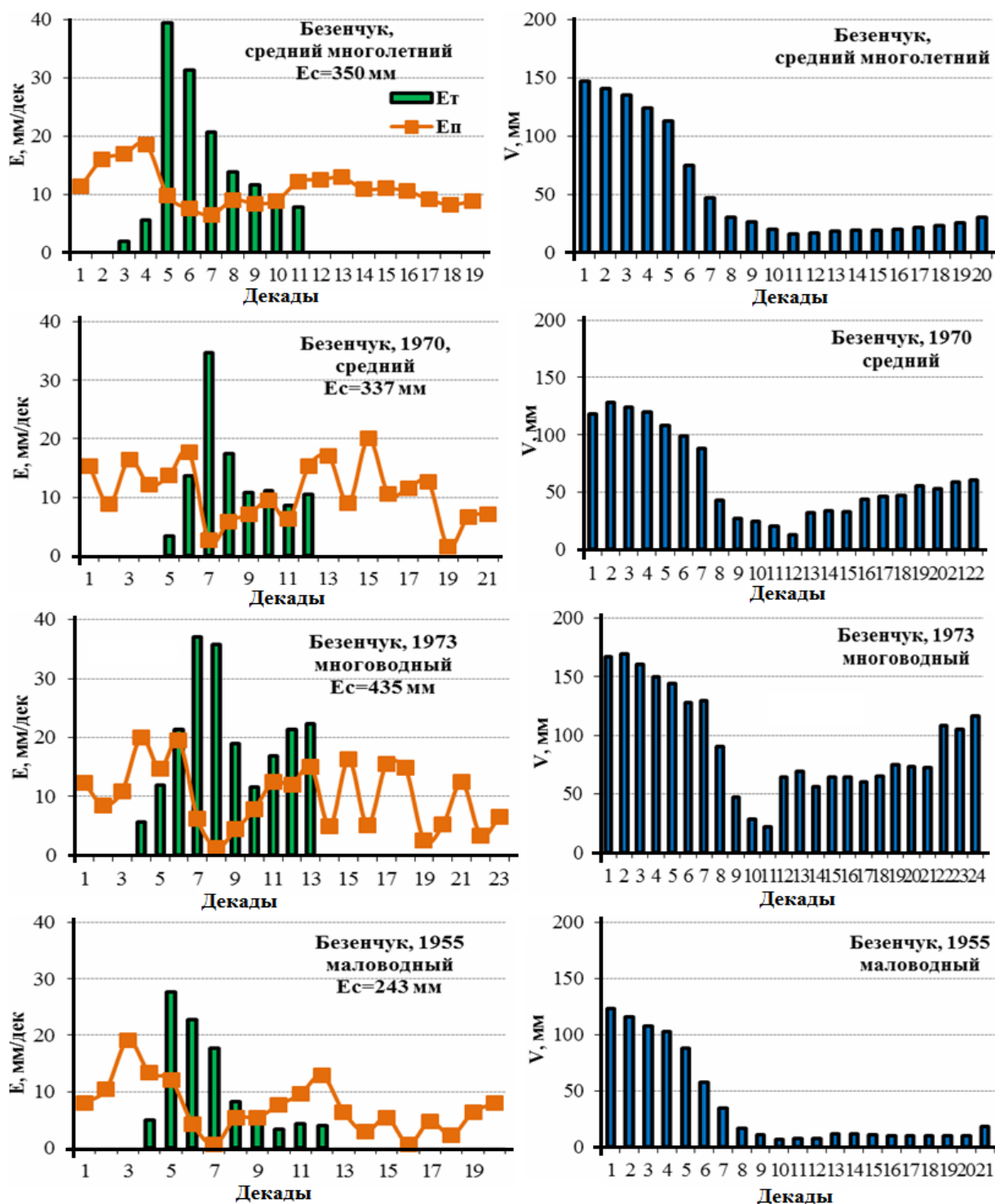


Рис. 1. Динамика декадных величин транспирации E_t , испарение воды почвой E_p , и продуктивных запасов воды V в метровом слое почвы полей яровой пшеницы в Безенчуке в разные по водности годы. Условные обозначения к рисункам 1-4: по оси ОХ – дан порядковый номер декады с момента схода снежного покрова. **Fig. 1.** Dynamics of decade values of transpiration E_t , soil evaporation E_p and productive water reserve V in the one-meter-deep layer of soil on the spring wheat pastures in Bezenchuk during the years with different water content. Legend to figures 1-4: on the OX axis the serial number of decade (from the moment of snow melting) is given.

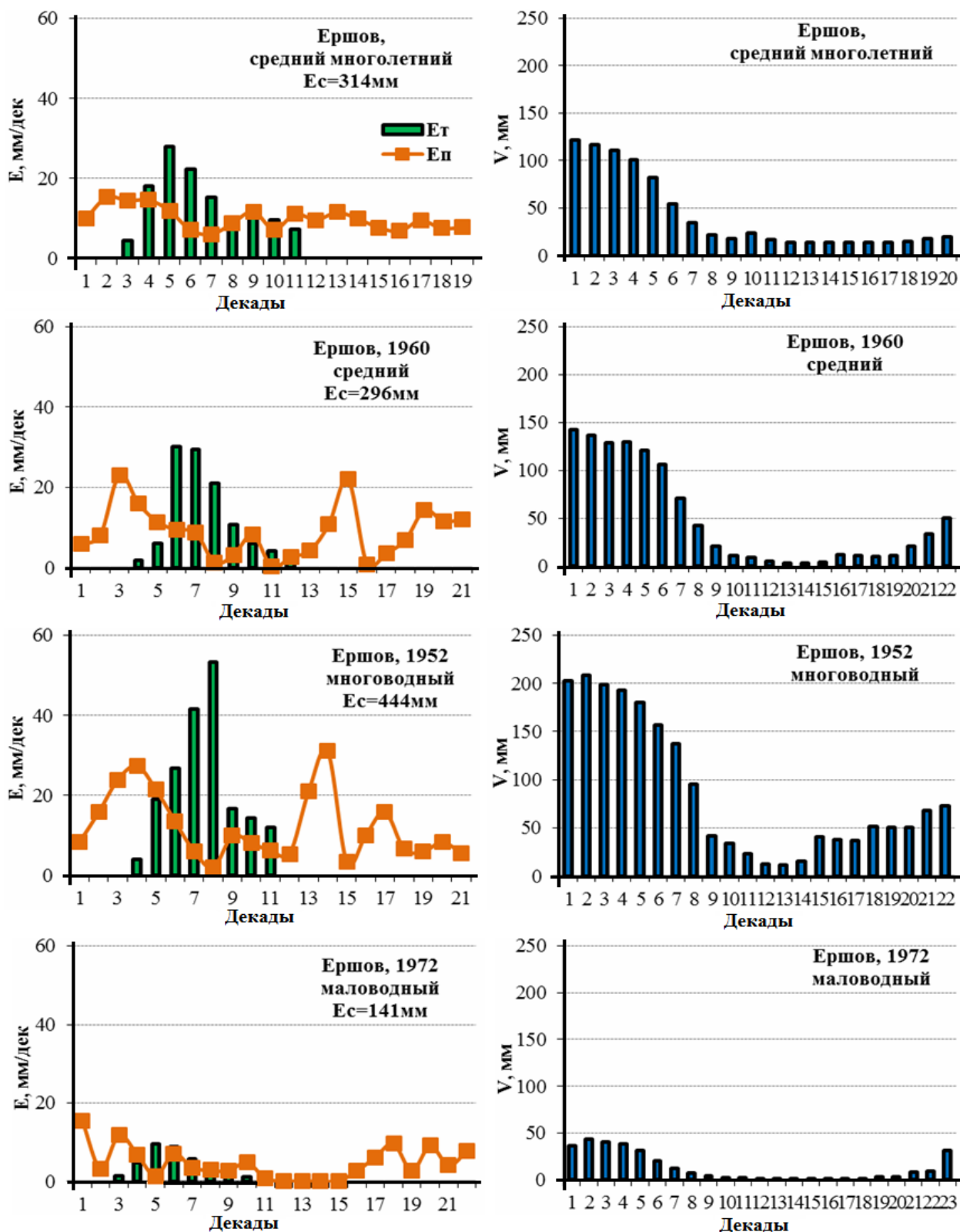


Рис. 2. Динамика декадных величин транспирации E_t , испарение воды почвой $E_{п}$, и продуктивных запасов воды V в метровом слое почвы полей яровой пшеницы в Ершове в разные по водности годы. **Fig. 2.** Dynamics of decade values of transpiration E_t , soil evaporation $E_{п}$ and productive water reserve V in the one-meter-deep layer of soil on the spring wheat pastures in Ershov during the years with different water content.

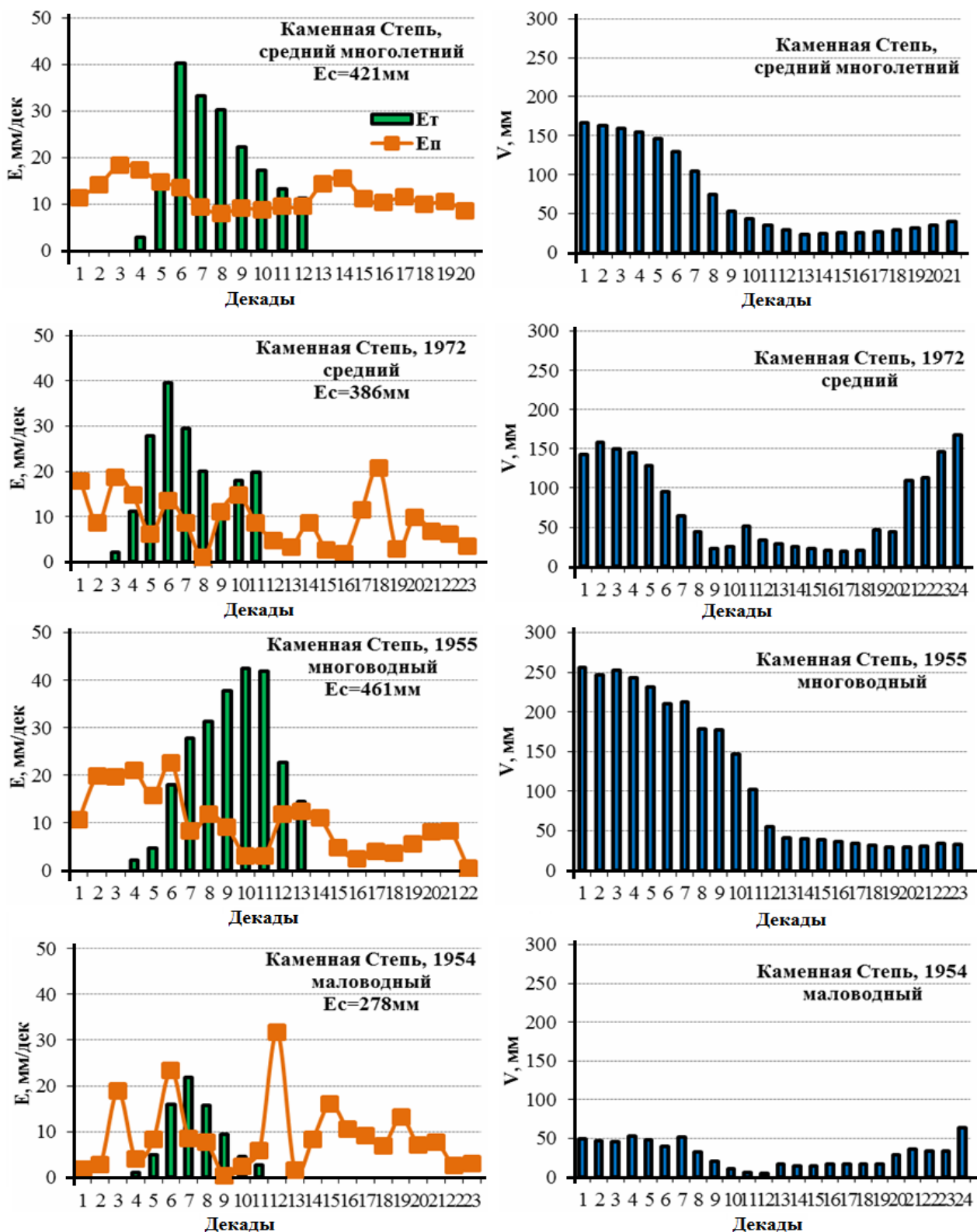


Рис. 3. Динамика декадных величин транспирации E_T , испарение воды почвой E_{II} , и продуктивных запасов воды V в метровом слое почвы полей яровой пшеницы в Каменной Степи в разные по водности годы. **Fig. 3.** Dynamics of decade values of transpiration E_T , soil evaporation E_{II} and productive water reserve V in the one-meter-deep layer of soil on the spring wheat pastures in Kamennaya Steppe during the years with different water content.

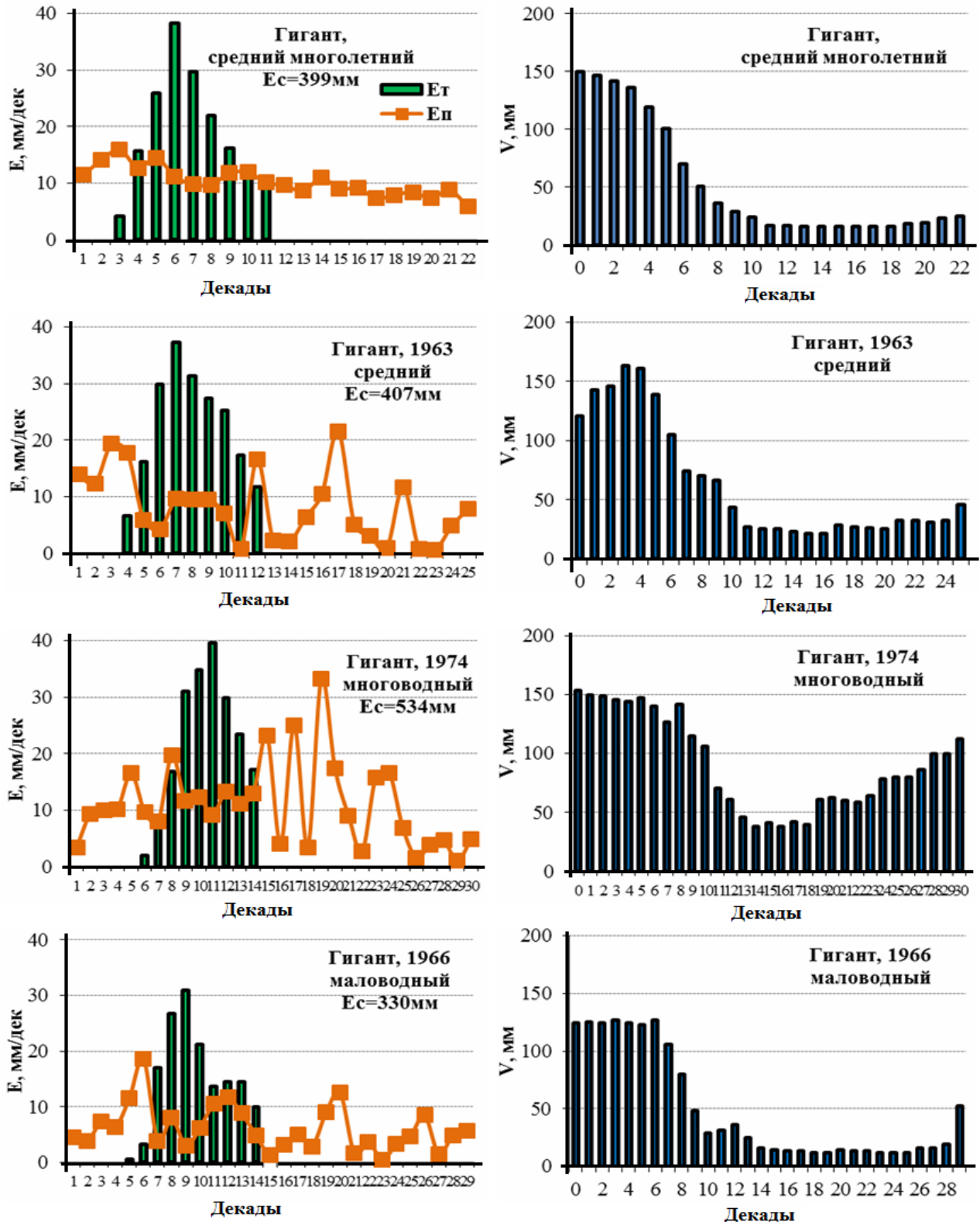


Рис. 4. Динамика декадных величин транспирации E_t , испарение воды почвой E_p , и продуктивных запасов воды V в метровом слое почвы полей яровой пшеницы в Гиганте в разные по водности годы. **Fig. 4.** Dynamics of decade values of transpiration E_t , soil evaporation E_p and productive water reserve V in the one-meter-deep layer of soil on the spring wheat pastures in Gigant during the years with different water content.

Затем, по мере развития растительного покрова, начинается резкое уменьшение запасов воды в почве, которые достигают минимальных значений к концу июля – началу августа, то есть к моменту уборки урожая яровой пшеницы. Далее запасы воды в почве начинают медленно возрастать, достигая на момент перехода температуры воздуха через 0°C своих наибольших значений осенью. Но все же они остаются гораздо ниже весенних запасов воды в почве.

Во внутригодовом ходе запасов воды можно выделить два типа. Первый – это изменение запасов воды в почве за безморозный период на метеорологических станциях Безенчук и Гигант. В период от полного схода снежного покрова до появления всходов запасы воды в почве для трех разных по величине испарения лет довольно высокие, но различия по величинам не очень большие; в период же после уборки различия в запасах воды в почве становятся гораздо значительнее. Ко второму типу можно отнести изменения запасов воды в почве на станциях Ершов и Каменная Степь. До появления всходов на этих станциях в почвенных запасах воды для лет с разными величинами суммарного испарения наблюдаются довольно существенные различия. К моменту уборки эта разница становится намного меньше, а затем ко времени установления отрицательных температур воздуха осенью опять увеличивается, но не так значительно.

Внутригодовая динамика суммарного испарения и его составляющих за отдельные конкретные годы повторяет среднюю многолетнюю динамику этих элементов с той лишь разницей, что изменения исследуемых величин происходят не так плавно, как в многолетнем разрезе, и это вполне естественно.

Для конкретного среднего года, многоводного и маловодного, характерно довольно плавное изменение транспирации и импульсивный ход испарения воды почвой, который обусловлен выпадающими осадками. Различия в ходе суммарного испарения среднего конкретного года и многоводного незначительны и связаны главным образом с тем, что значения суммарного испарения и транспирации в вегетационный период по величине несколько выше в многоводный год, причем различия между транспирацией и испарением воды почвой в вегетационный период довольно значительны в обоих случаях. Значения транспирации в многоводный год могут достигать 53 мм в декаду (Ершов).

Продуктивные запасы воды в метровом слое почвы в многоводный год довольно высокие, и практически до середины июня их значения превышают критические, определяемые согласно формуле (22). Иными словами, в этот период посеы яровой пшеницы развиваются в условиях оптимального увлажнения, не испытывая недостатка влаги. В Ершове и Каменной Степи значения продуктивных запасов воды весной в многоводный год превышают значения полевой влагоемкости и составляют 209 и 256 мм соответственно. Уменьшение запасов прослеживается до сентября в Ершове и Гиганте, затем отмечается их увеличение до 73 и 112 мм соответственно к моменту наступления отрицательных температур воздуха осенью. В многоводный год в Безенчуке снижение продуктивных запасов происходит до июля, после чего отмечается их увеличение, и к концу безморозного периода они достигают 116 мм. В Каменной Степи они уменьшаются до августа, а затем до конца безморозного периода отмечается их постоянство на уровне около 30 мм.

Остановимся подробнее на анализе внутригодовой динамики запасов воды в почве и суммарного испарения в засушливые годы. Наиболее подвержены засухам сельскохозяйственные поля в Ершове. Расчеты показывают, что в Ершове при катастрофической засухе 1972 года суммарное испарение полей, занятых посевами яровой пшеницы, за безморозный период составило 141 мм, в том числе на долю транспирации пришлось всего 38 мм. Весь апрель продуктивные запасы воды в метровом слое почвы отмечались на уровне 40 мм, что гораздо ниже потребности посевов во влаге, а с июня по октябрь почва практически не содержала продуктивной влаги.

В Каменной Степи катастрофическая засуха пришлась на 1954 год. В апреле и мае продуктивные запасы воды в метровом слое почвы отмечались на уровне 50 мм, чего явно недостаточно для нормального произрастания и развития сельскохозяйственных культур. С июня по сентябрь запасы воды не превышали 20 мм. И это притом, что в Каменной Степи, проведена система агролесомелиоративных мероприятий, начатых В.В. Докучаевым и направленных на сохранение влаги на сельскохозяйственных полях, почвы на которых хорошо окультурены. В 1954 году в Каменной Степи суммарное испарение за безморозный период оценивается в 278 мм, транспирация – 76 мм.

Несколько иная динамика продуктивных запасов воды в почве в маловодные годы отмечается в Безенчуке и Гиганте. В Безенчуке наиболее засушливым является 1955 год. С момента всходов по май включительно запасы воды превышают критические и растения не испытывают недостатка влаги. С июня запасы быстро снижаются, и в период с июля по октябрь их значения составляют около 10 мм. Транспирация полей яровой пшеницы в 1955 году в Безенчуке составила 98 мм.

В Гиганте маловодным является 1966 год. С февраля по апрель наблюдались довольно высокие запасы воды в почве, превышающие 100 мм. Поэтому в начальные фазы развития посева (в апреле и начале мая) яровая пшеница не испытывала недостатка влаги. Затем запасы начали снижаться и с июля по ноябрь составили немногим более 10 мм. В период вегетации значения транспирации (за исключением начальных фаз развития, когда растения не образуют сомкнутый покров) превышали значения испарения воды почвой. Вид кривых испарения и транспирации в Гиганте повторяет конфигурацию аналогичных кривых за 1963 и 1974 годы с той лишь разницей, что абсолютные значения испарения и транспирации в маловодном году несколько ниже.

Выполненные расчеты составляющих суммарного испарения полей яровой пшеницы за безморозный период также позволили оценить, насколько эффективно расходуются запасы воды в почве. Данная оценка весьма актуальна, так как основные зернопроизводящие регионы России, расположенные в лесостепной и степной зонах, подвержены систематическим засухам, частым и интенсивным; рациональное использование запасов почвенных вод, в основе которого лежат приемы «сухого земледелия», может привести к получению достаточно высоких и устойчивых урожаев. Соотношение между значениями транспирации и испарения воды почвой полей яровой пшеницы за безморозный период в различные по водности годы представлены на рисунке 5, из которого видно, что практически повсеместно доля транспирации в суммарном испарении полей яровой пшеницы за безморозный период в исследуемом регионе не превышает 50%; а в засушливые годы в Ершове (1972 г.) и Каменной Степи (1954 г.) может снижаться и вовсе до 27%.

Заключение

Безморозный период – это период интенсивного расходования влаги на испарение с сельскохозяйственных полей. При общей продолжительности безморозного периода исследуемой территории, составляющей 20-23 декады (в Гиганте 25-30 декад), период вегетации посевов яровой пшеницы лежит в пределах 8-10 декад.

Кривые распределения декадных значений испарения воды почвой, транспирации и продуктивных запасов воды в метровом слое почвы полей яровой пшеницы за безморозный период имеют общую конфигурацию с определенными различиями, обусловленными природно-климатическими условиями агрометеорологической станции, водностью года и характером выпадения осадков за безморозный период. Максимальные декадные значения суммарного испарения приходятся в большинстве случаев на третью декаду мая или первую декаду июня и составляют более 40 мм; максимум транспирации по времени совпадает с

максимумом суммарного испарения. В отдельные декады лет повышенной водности при хорошо развитых посевах почва практически полностью экранируется, что сводит испарение воды почвой практически к нулю. Такая ситуация наблюдалась в Ершове в третьей декаде июня 1952 года, когда транспирация и испарение воды почвой были равны 53 и 2 мм соответственно; в Каменной Степи в первой и второй декадах июля 1955 года при транспирации 46-45 мм испарение воды почвой составило 3 мм.

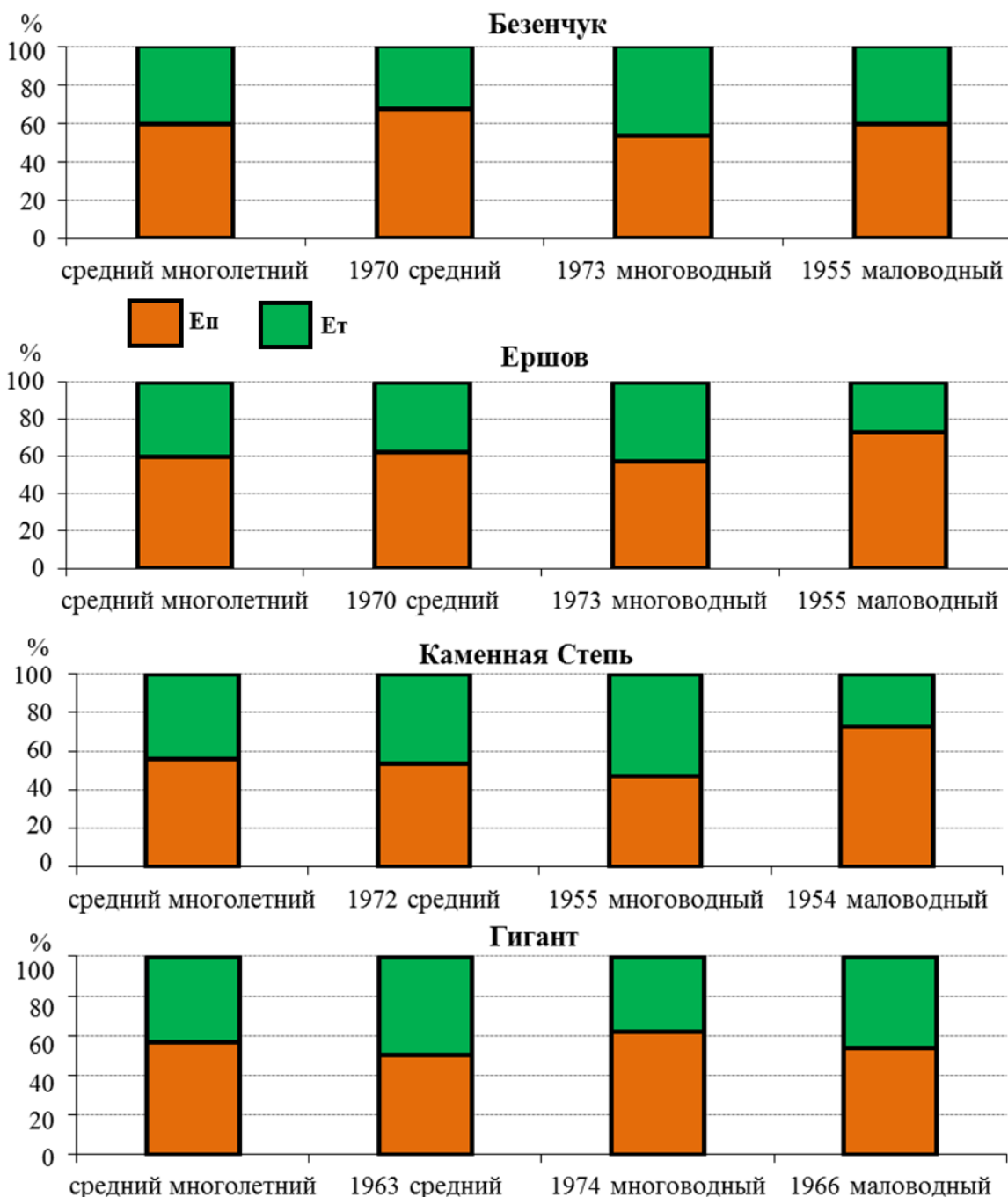


Рис. 5. Соотношение между значениями транспирации и испарения воды почвой полей яровой пшеницы за безморозный период в различные по водности годы. **Fig. 5.** Correlation between transpiration and soil evaporation values on the pastures of spring wheat during the frost-free period of the years with different water content.

Что касается всего безморозного периода, то в многоводные годы значения суммарного испарения полей яровой пшеницы находятся в пределах от 435 мм (Безенчук, 1973 г.) до 534 мм (Гигант, 1974 г.); в маловодные годы значения суммарного испарения лежат в диапазоне от 141 мм (Ершов, 1972 г.) до 330 мм (Гигант, 1966 г.). Транспирации посевов яровой пшеницы за период вегетации в многоводные годы изменяется на исследуемой территории в довольно узких пределах, а именно от 188 мм (Ершов, 1952 г.) до 244 мм (Каменная Степь, 1955 г.); значение транспирации в год катастрофической засухи в Ершове в 1972 году опускалось до 38 мм.

Иными словами, в основных зернопроизводящих регионах пороговые значения (пределы изменения) суммарного испарения с полей яровой пшеницы за безморозный период могут составить в многоводные годы 534 мм (Гигант, 1974 г.), снижаясь в маловодные до 141 мм (Ершов, 1972 г.); пороговые значения транспирации – это, соответственно, 244 мм (Каменная Степь, 1955 г.) и 38 мм (Ершов, 1972 г.).

В целом доля транспирации в суммарном испарении полей яровой пшеницы за безморозный период не превышает 50% и может снижаться до 27% в экстремально засушливые годы.

Приведенные оценки структуры суммарного испарения, а именно соотношение между испарением воды почвой и транспирацией, показывают крайне нерациональное расходование запасов почвенных вод полями яровой пшеницы, когда на формирование урожая (транспирацию) используется не более половины от общего расхода запасов почвенных вод на суммарное испарение. В то же время, имеют место значительные резервы повышения транспирации в случае применения агротехнических приемов по снижению испарения воды почвой. Уменьшение испарения воды почвой на определенную величину приводит к увеличению транспирации на ту же величину; при этом значения суммарного испарения остаются неизменными, изменяется лишь соотношение между испарением воды почвой и транспирацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алпатьев А.М.* 1954. Влагооборот культурных растений. Л.: Гидрометеиздат. 246 с.
- Алпатьев С.М.* 1965. О поливных режимах сельскохозяйственных культур // *Орошаемое земледелие в Европейской части СССР*. М.: Колос. С. 185-190.
- Алпатьев А.М.* 1969. Влагообороты в природе и их преобразование. Л.: Гидрометеиздат. 323 с.
- Будаговский А.И.* 1964. Испарение почвенной влаги. М.: Наука. 242 с.
- Будаговский А.И.* 1981. Испарение почвенных вод // *Физика почвенных вод*. М.: Наука. С. 13-95.
- Будаговский А.И., Шумова Н.А.* 1976. Методы анализа структуры суммарного испарения и оценки эффективности его регулирования // *Водные ресурсы*. № 6. С. 83-98.
- Будыко М.И.* 1956. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеиздат. 254 с.
- Будыко М.И.* 1971. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат. 472 с.
- Бусарова О.Е., Гусев Е.М.* 1995. Использование результатов моделирования изменения климата для оценки изменений суммарного испарения на территории Европы // *Метеорология и гидрология*. № 10. С. 29-34.
- Бусарова О.Е., Шумова Н.А.* 1987. Биометрические характеристики посевов некоторых сельскохозяйственных культур и их использование для расчетов испарения // *Водные ресурсы*. № 2. С. 130-135.
- Вериго С.А., Разумова Л.А.* 1973. Почвенная влага. Л.: Гидрометеиздат. 328 с.
- Гаевский В.Л.* 1953. К вопросу о роли альбедо в формировании радиационного режима

- поверхности // Труды ГГО. Вып. 39 (101). С. 150-163.
- Гальперин Б.М.* 1949. Радиационный баланс Нижнего Поволжья за теплый период // Труды ГГО. Вып. 18 (80). С. 61-86.
- Данилова Н.А.* 1965. Суммарное испарение с полей озимых и яровых культур за вегетационный период // Тепловой и радиационный баланс естественной растительности и сельскохозяйственных полей. М.: Наука. С. 117-126.
- Зубенок Л.И.* 1974. Испарение на территории Советского Союза // Влагооборот в природе и его роль в формировании ресурсов пресных вод. М.: Стройиздат. С. 100-113.
- Константинов А.Р.* 1968. Испарение в природе. Л.: Гидрометеиздат. 532 с.
- Константинов А.Р., Астахова Н.И., Левенко А.А.* 1971. Методы расчета испарения с сельскохозяйственных полей. Л.: Гидрометеиздат. 127 с.
- Минаева Е.Н.* 1975. Биологические характеристики хлопчатника // Мелиорация земель в Туркменистане. Вып. 2. С. 27-37.
- Ничипорович А.А.* 1956. Фотосинтез и теория получения высоких урожаев // Тимирязевские чтения XI. М.: Изд-во АН СССР. 94 с.
- Ничипорович А.А.* 1961. О свойствах посевов растений как оптической системы // Физиология растений. Вып. 5. С. 536-546.
- Ольдекоп Э.М.* 1911. Об испарении с поверхности речных бассейнов. Т. 4. 209 с.
- Росс Ю.К.* 1975. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат. 342 с.
- Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям. 1957. Л.: Гидрометеиздат. 124 с.
- Руководство по градиентным наблюдениям и определению составляющих теплового баланса. 1964. Л.: Гидрометеиздат. 130 с.
- Руководство по контролю и обработке наблюдений над фазами развития сельскохозяйственных культур. 1955. Л.: Гидрометеиздат. 108 с.
- Русин Н.Н.* 1958. Радиационный баланс поля, засеянного зерновыми культурами // Труды ГГО. Вып. 77. С. 49-56.
- Савина С.С.* 1966. Определение площади листьев зерновых культур по материалам наблюдений агрометеостанций // Метеорология и гидрология. № 5. С. 50-51.
- Самарина Н.Н.* 1969. Методика и некоторые результаты исследований биометрической структуры посевов сельскохозяйственных культур // Известия АН СССР. Серия географическая. № 1. С. 106-114.
- Струзер Л.Р., Русин Н.П.* 1956. Сравнение различных методов определения испарения с сельскохозяйственных полей // Труды ГГИ. Вып. 57 (3). С. 93-124.
- Тертерян Б.А.* 1971. Методика и некоторые результаты исследований взаимосвязи между радиационным режимом и биометрической структурой растительного покрова // Биологический журнал Армении. Т. 24. № 2. С. 24-32.
- Харченко С.И.* 1975. Гидрология орошаемых земель. Л.: Гидрометеиздат. 374 с.
- Чирков Ю.И.* 1965. Основы долгосрочного агрометеорологического прогноза урожая зерна кукурузы // Метеорология и гидрология. № 9. С. 3-7.
- Шумова Н.А.* 1994. Относительная площадь листьев в расчетах суммарного испарения посевов яровой пшеницы // Водные ресурсы. Т. 21. № 6. С. 697-703.
- Шумова Н.А.* 2003. Оценка точности модели для расчета динамики запасов воды в почве // Метеорология и гидрология. № 10. С. 124-133.
- Шумова Н.А.* 2004. Соотношение ресурсов тепла и влаги в лесостепной и степной зонах при возможном изменении климата // Материалы второй всероссийской научно-практической конференции «Эколого-географические исследования в речных бассейнах». Воронеж. С. 180-183.

- Шумова Н.А.* 2017. Методические подходы к оценке относительной площади листьев растений агроценозов // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1. № 1. С. 74-92. [Электронный ресурс <http://www.ecosystemsdynamic.ru> (15.12.2017)].
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.* 1998. Crop Evapotranspiration. Rome. 300 p.
- Carter T.R., Parry M.L., Nishioka S., Harasawa H.* 1992. Preliminary Guidelines for Assessing Impacts of Climate Change. Environmental Change Unit, Oxford, United Kingdom, and Center for Global Environmental Research, Tsukuba, Japan. 28 p.
- Monteith J.L.* 1965. Evaporation and Environment // The State and Movement of Water in Living Organisms. Symposia of the Society for Experimental Biology. Vol. 19. New York, Academic Press. P. 205-234.
- Monteith J.L.* 1985. Evaporation from Land Surface: PROGRESS in analysis and Prediction Since 1948 // Advances in Evapotranspiration. Proceedings of the ASAE Conference on Evapotranspiration. Chicago, Ill. ASAE, St. Joseph, Michigan. P. 4-12.
- Novak V.* 1995. Impact of Climate Change upon the Annual Water Balance over Slovakia // Journal of Hydrology and Hydromechanics. Vol. 43. No. 1-2. P. 102-115.
- Penman H.L.* 1948. Natural Evaporation from Open Water, BARE SOIL and grass // Proceedings of the Royal Society of London. A193. P.120-146.
- Penman H.L.* 1956. Evaporation: an Introductory Survey // Netherlands Journal of Agricultural Science. Vol. 4. P. 9-29.
- Philip J.R.* 1957. Evaporation, and Moisture and Heat Fields in the Soil // Journal of Applied Meteorology and Climatology. Vol. 14. P. 354-366.
- Thorntwaite C.W.* 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate // Geography Revision Material. Vol. 38 (1). P. 55-94.

EVALUATION AND ANALYSIS OF EVAPORATION, TRANSPIRATION AND WATER RESERVE IN THE SOILS OF THE SPRING WHEAT PASTURES DURING THE FROST-FREE PERIOD OF THE YEARS WITH DIFFERENT WATER CONTENT

© 2018. N.A. Shumova

Water Problems Institute of RAS

Russia, 119333, Moscow, Gubkina Str., 3. E-mail: shumova_aqua@rambler.ru

The short review of the most common methods of evaporation measuring is presented in the article. We show how to calculate the total soil evaporation, its components, and the water reserve in the soils; we also describe the parameters of our information support. We indicate the dynamics of the decade values of soil evaporation on the spring wheat pastures during the frost-free period of the years with different water content in the main grain-producing regions of Russia. We evaluate the correlation between transpiration and soil evaporation during the same period.

Keywords: spring wheat, soil evaporation, transpiration, water reserve, dynamics, frost-free period.

DOI: 10.24411/ 2542-2006-2018-10009