© Домнин Д. А., 2026, Океанологические исследования, 2026, Том 54, № 3, С. 38–60

УДК 556.55 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).3

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛЬНЫХ ОЦЕНОК ДЛЯ МАЛОГО БЕССТОЧНОГО ВОДОЕМА ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ МОРЯ

Д. А. Домнин

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: dmitriy.domnin@atlantic.ocean.ru

На основе комплексного анализа натурных данных (2023–2024 гг.) и численных оценок выполнен расчет водного баланса бессточного прибрежного водоема Юго-Восточной Балтики – пруда Янтарного (Калининградская область). Установлены количественные характеристики всех основных составляющих баланса: осадков, испарения, поверхностного и подземного стоков. Для расчета испарения апробированы три эмпирические формулы (Мейера, Ровера, Викулиной–Браславского); показано, что наиболее физически обоснованные результаты для условий региона дает уравнение Ровера. Годовая сумма испарения по нему составила 680 мм в 2023 г. и 600 мм в 2024 г. (за неполный год). Поверхностный сток с водосбора, оцененный с помощью модели HYPE, характеризуется резкой сезонной неравномерностью: от 70 мм/мес в зимние месяцы до 3–7 мм/мес в летнюю межень. Впервые для данного водоема получена количественная оценка подземной составляющей водного баланса методом невязки. Установлена выраженная межгодовая изменчивость подземного водообмена: в 2023 г. преобладал отток подземных вод из пруда (–420 мм), в 2024 г. зафиксирован приток (+130 мм), что объясняется инерционностью фильтрационных процессов и буферной емкостью системы «озеро – грунтовые воды». Корреляционный анализ выявил запаздывающую реакцию уровня воды на изменение подземного стока с характерным временем отклика около двух месяцев. Полученные результаты могут служить методической основой для региональных оценок водного баланса прибрежных водоемов Калининградской области.

Ключевые слова: водный баланс, подземный водообмен, численное моделирование, Юго-Восточная Балтика, Калининградская область, пруд Янтарный

1. Введение

Изменение климата на современном этапе оказывает существенное воздействие на гидрологические системы различного уровня и генезиса (Jain, 2016; Shiklomanov, 1989). Рост среднегодовых температур воздуха, изменение режима и интенсивности атмосферных осадков, а также учащение экстремальных погодных явлений, трансформируют водный баланс (Djikic et al., 2024; Kuang et al., 2024). Эти процессы оказывают комплексное воздействие на термический и уровенный режимы внутренних и прибрежных водоемов, приводя к перестройке их гидрологических процессов и сокращению периодов ледостава (Piccolroaz et al., 2024). Данная проблема усугубляется повышением испаряемости как с поверхности водоемов, так и с их водосборов, что часто становится

доминирующим фактором, нивелирующим даже экстремальное выпадение осадков и рост уровня воды (La Fuente et al., 2024; Монкаева, 2024).

С точки зрения отслеживания влияния климатических изменений и антропогенного воздействия особый интерес представляют малые водоемы, которые, в отличие от крупных озерных систем, обладающих высокой инерционностью и буферной емкостью, характеризуются быстрой реакцией на внешние воздействия (Jeppesen et al., 2014). Их гидрологические свойства и водный баланс в значительной степени зависят от внешних локальных условий природного и антропогенного происхождения, а морфометрические особенности (например, площадь зеркала, уклоны ложа и объем) обусловливают высокую скорость прогрева водной толщи и резкие колебания уровня даже при незначительных отклонениях гидрометеорологических параметров (Woolway et al., 2020; Мякишева, Бирюкова, 2018; Ivkina, 2022). Большие амплитуды колебаний характерны для изолированных, часто бессточных, водоемов озерного типа, где основными входящими параметрами водного баланса являются атмосферные осадки и приток подземных вод, а исходящими – испарение и подземный сток (Галахов и др., 2010). При устоявшемся гидрологическом режиме, а также налаженной системе водопользования, колебания уровня воды происходят в оптимальных границах (Болгов и др., 2017).

Наряду с атмосферными осадками и поверхностным стоком, существенным, но зачастую трудно учитываемым фактором, определяющим колебания уровня водной поверхности и водный баланс малых водоемов, является подземный водообмен (Rosenberry et al., 2015; Winter et al., 1998). В отличие от крупных озерных систем, в водном балансе которых подземная составляющая зачастую невелика (Бородулина, 2011), в малых водоемах ее роль может быть существенной и варьировать от долей процента до более 90 % от приходной части водного баланса (Rosenberry et al., 2015). Особенно велико значение подземного питания для водоемов площадью менее 100 га, и оно уменьшается с увеличением площади водного объекта. А в засушливые периоды, при минимальном поверхностном стоке, подземная составляющая может становиться основным фактором, поддерживающим уровень воды (Winter et al., 1998). Для малых глубоких водоемов подземный сток может быть представлен как сосредоточенными родниковыми выходами на дне, так и диффузной инфильтрацией по всему ложу, что создает сложную пространственно-временную картину водообмена (Lewandowski et al., 2024; Matusiak et al., 2025; Tóth, 1971). При этом интенсивность процесса определяется гидравлической связью водоема с питающими его подземными водами (Martin et al., 2025). Эта связь зависит от сезонных колебаний их уровня, фильтрационных свойств пород (Harvey et al., 1997) и морфометрии котловины (Zhang et al., 2024).

Вместе с тем, на режим подземных вод существенно влияет хозяйственная деятельность: массовый водозабор для хозяйственно-питьевого водоснабжения и для промышленных нужд на прилегающих территориях приводят к возникновению депрессионных воронок (Хубларян и др., 2008), снижению уровня грунтовых вод и, как следствие, к сокращению подземного питания (Jiang et al., 2024). Так, подземная составляющая водного баланса выступает важнейшим регулятором многолетней и

внутригодовой динамики уровня внутренних водоемов, а ее нарушение в результате хозяйственной деятельности может приводить к необратимым изменениям озерных экосистем (Хубларян и др., 2008; Rosenberry et al., 2015; Lewandowski et al., 2024).

Таким образом, для малых водоемов характерно наложение региональных изменений климата на локальные гидроморфологические условия, а связанные с ними изменения гидрологических характеристик являются значимыми факторами использования водоемов в хозяйственной деятельности.

Вдоль морского побережья и побережий Куршского и Калининградского/Вислинского заливов в Юго-Восточной Балтике расположены прибрежные водоемы (англ. *coastal lakes*), отделенные от моря узкими барьерами суши, но имеющие связь с принимающим морским водоемом посредством проток, заплеска или инфильтрации через защитный барьер (Oertel, 2005; Cieśliński, Olszewska, 2018). Кроме процессов, характерных для любого водоема суши, для прибрежных добавляется «морская» составляющая. В Калининградской области такие водоемы образуют озерные группы: группа прибрежных водоемов западного побережья Самбийского полуострова, группа обводненных карьеров северо-восточного побережья Калининградского залива, гидрогенные озера полуострова Бальга, а также отдельные озера Куршской косы – Чайка, Лебедь, Изумруд (рисунок 1).

Учитывая сложность оценки всех составляющих водного баланса для таких водоемов, включая подземный сток и влияние моря, для балансовых расчетов был выбран прибрежный изолированный бессточный водоем, в котором соленость/минерализация постоянна, а водосбор минимален. Таким модельным водоемом стал пруд Янтарный, для которого посредством натурных наблюдений и модельных оценок проведены расчеты водного баланса и получены первые оценочные результаты подземной составляющей.

2. Исследуемая территория

Пруд Янтарный вместе с тремя пляжевыми лагунными озерами входит в систему прибрежных водоемов (обводненных карьеров), образовавшихся на месте добычи янтаря, расположенных в Юго-Восточной Балтике, на западном побережье Самбийского полуострова Калининградской области России (рисунок 1). Карьеры объединены между собой в систему посредством подземных водоносных горизонтов (Домнин и др., 2023) и преимущественно испытывают на себе влияние климатических условий. Кроме поверхностного и подземного стоков, пляжевые лагунные озера находятся под воздействием изменчивости моря, выраженной в том, что при высоком уровне моря происходит инфильтрация соленой воды через песчаный барьер, а в периоды ветровых нагонов заплеск забрасывает морскую воду через пляж, что отражается на изменении солености, экстремальном повышении уровня и увеличении площади пляжевых озер (Domnin et al., 2024). Но так как пруд Янтарный отделен от моря массивом коренного берега (шириной 400–500 м) и пляжем, колебания уровня водной поверхности не связаны с изменениями уровня моря.

Пруд имеет вытянутую с юга на север форму, его зеркало с размерами 2.0×1.1 км имеет площадь 1.2 км^2 (рисунок 1). Урез воды (на декабрь 2022 г.) имеет отметку +10.0 м над уровнем моря. Максимально измеренная глубина составляет 23.6 м. С учетом привязки рельефа дна пруда Янтарного к рельефу окружающей территории наиболее глубинная часть располагается ниже уровня моря на 13.6 м (Домнин и др., 2023). Рельеф водосбора имеет высоты до 50 м, а возвышенные участки отделяют водоем от действующего карьера месторождения по добыче янтаря «Приморское». Ввиду того, что крупные формы рельефа осложнены локальными антропогенными формами, а русла некоторых водотоков преобразованы в подземное течение, за общую площадь водосбора (12.8 км^2) принята территория, относящаяся и к пляжевым лагунным озерам (Домнин и др., 2023). В настоящей работе сделано уточнение – площадь водосбора пруда Янтарного (за вычетом площади самого водоема) составляет около 3.5 км^2. Это значение принято для дальнейших оценок.

Основные источники питания пруда Янтарного – атмосферные осадки и подземные воды.



Рис. 1 – Расположение на побережье Калининградской области в Юго-Восточной Балтике (**а**) прибрежных водоемов (**б**), в т. ч. пруда Янтарного и его водосбора (**в**)

Пруд питают воды днепровско-московского межморенного (*IIdn-ms*), среднепалеогенового (верхнеэоценовый прусской свиты) (P_2^3pr) и нижненеогенового (N_1) водоносных горизонтов, которые также служат источником водоснабжения для окрестных населенных пунктов. Так как эти горизонты простираются под морским дном и захватывают территорию действующего карьера по добыче янтаря, то посредством них может быть обеспечена взаимосвязь пруда Янтарного и водоемов в пляжевой зоне между собой, с морем и карьером (Домнин и др., 2023).

3. Материалы и методы

3.1. Сбор исходных данных

Для оперативного отслеживания хода уровня воды был сконструирован опытный образец в виде погружного автономного самописца, производящего как измерения абсолютного давления с диапазоном 0–2.5 Бар, так и температуры воды. Прибор для тестового использования был размещен в юго-западной части пруда Янтарный, погружной модуль на подводном склоне на бетонном основании на глубине около 5 м и на удалении от берега около 40 м, надводный (регистрационный) модуль на высоте около 4 м над урезом воды (рисунок 2). Данное расположение обусловлено техническими особенностями прибора (ориентация надводного модуля для питания от солнечной батареи, ограничение длины связующего кабеля, возможность обслуживания погружного модуля при длительной постановке) и геоморфологическими характеристиками объекта (ниже указанной глубины начинается резкий свал глубин, что осложняет фиксирование основания). Абсолютная высотная привязка прибора не производилась, данные по уровню имели относительные значения в метрах (м), по температуре – абсолютные в градусах Цельсия (°C). Разрешение по определению уровня составляет 0.01 м, по температуре – 0.01 °C. Погрешность при измерении уровня составляет ±2 %, измерении температуры ±1 %. Опрос датчиков производился один раз в 20 минут. Обработка значений всех датчиков, внесение поправок, пересчет значения давления водного столба в глубину, внесение поправки на значения атмосферного давления осуществлялись в режиме постобработки в камеральных условиях (Домнин и др., 2024). Период измерений на автономной станции составил 22 месяца (январь 2023 г. – октябрь 2024 г.). Перерывов в измерениях не было.

Кроме того, в отдельные месяцы в период 2023–2024 гг. на станции FQ02 посредством вертикальных зондирований (с шагом 5 см) от поверхности до дна выполнены измерения температуры воды с использованием CTD-зонда Idronaut Ocean Seven 316 (IDRONAUT, Италия). Точность измерений давления составляет 0.05 % от измеренного значения, электропроводности – 0.003 мСм/см, температуры – 0.002 °C.

Для анализа метеорологической обстановки, моделирования и сравнения с гидрологическими параметрами в период с 2022 по 2024 гг. использовались данные, полученные из открытых источников (Reliable…, 2026) с прибрежной метеостанции Балтийск, расположенной на юге западного побережья Самбийского полуострова (26701, 54°39′ с. ш., 19°55′ в. д.). В работе использованы параметры (срочные и осредненные на сутки): температура воздуха (°C), скорость ветра (м/с), количество выпавших осадков (мм в сутки), относительная влажность воздуха (%), атмосферное давление (гПа).

Визуальная и количественная оценка наличия ледового покрова на поверхности Янтарного выполнена с помощью спутниковых мультиспектральных данных программы Sentinel-2 (Copernicus, 2021). Для периода наблюдений (2008–2025 гг.) использован набор из 47 снимков.

3.2. Расчет водного баланса замкнутого водоема

Водный баланс водоема – это соотношение между притоком и оттоком воды в нем за определенный промежуток времени, то есть сопоставление количества поступающей и расходуемой воды (Bengtsson, 2012). Бессточные водоемы, к которым относится и пруд Янтарный, характеризуются отсутствием естественного поверхностного оттока вод, что принципиально отличает их от проточных озер. В таких водоемах вся поступившая вода в основном расходуется на испарение, а изменение уровня определяется соотношением между приходной и расходной частями баланса (Кондакова и др., 2020). Но для пруда Янтарного особую роль играют подземные воды, которые влияют как на приходную, так и на расходную части (Домнин и др., 2023). Кроме того, рассматриваемый водоем можно отнести к котловинным озерам, которые являются частью системы подземных вод и имеют только подземный приток и отток, а уровень воды варьирует в зависимости от внешних условий (Bengtsson, 2012).

На основании математического выражения водного баланса (Догановский, Мякишева, 2015), для бессточного водоема уравнение баланса с учетом разницы площадей водосбора и водоема (Lundgren et al., 2019) представлено в слоевом выражении:

$$P+\left(Q\cdot\frac{F_w}{F_b}\right)+G_{in}-E-G_{out}=\pm\Delta H, \tag{1}$$

где P – слой осадков на водную поверхность, Q – слой стока с водосборного бассейна, G_{in} – приток подземных вод, E – слой испарения с водной поверхности, G_{out} – отток подземных вод, ΔH – приращение уровня воды, а все члены уравнения выражены в мм, кроме F_w – площадь водосбора, F_b – площадь водоема, эти величины выражены в км^2.

Для расчета величины испарения с водной поверхности использованы эмпирические уравнения Мейера (Meyer) (2) и (Rohwer) (3) (Dhada et al., 2025), а также уравнение Викулиной–Браславского (формула Государственного гидрологического института) (4):

$$E=K_M\cdot\left(e_w-e_a\right)\cdot\left(1+\frac{U}{4.44}\right), \tag{2}$$

$$E=0.771\cdot(1.465-0.000732\cdot P_a)\cdot(0.44+0.0733\cdot U)\cdot(e_w-e_a), \tag{3}$$

$$E=0.14\cdot(e_w-e_a)\cdot(1+0.72\cdot U), \tag{4}$$

где E – слой испарения водной поверхности (мм); K_M – эмпирический коэффициент, зависящий от размера и глубины водоема, для малого, но глубокого водоема принято значение 0.36; e_w – давление насыщенного пара при температуре поверхности воды (гПа); e_a – фактическое давление пара в воздухе на определенной высоте; U – средняя скорость ветра (м/с); P_a – среднее барометрическое давление (гПа).

Давление насыщенного пара (e_w) и фактическое давление пара в воздухе (e_a) рассчитаны по формулам Магнуса (Magnus) (5, 6) (Sonntag, 1990):

$$e_w = A \cdot \exp\left(\frac{b \cdot t_w}{c + t_w}\right), \quad (5)$$

$$e_a = \frac{f}{100} \cdot e_w\left(t_a\right), \quad (6)$$

где t_w – температура поверхности воды (°C); A, b, c – эмпирические коэффициенты Всемирной метеорологической организации (A = 6.112, b = 17.62, c = 243.12) (Sonntag, 1990); f – относительная влажность воздуха (%); t_a – температура воздуха (°C).

Имея непрерывные данные о температуре воды на глубине 5 м и данные гидрологических зондирований в отдельные моменты времени, было проведено сравнение этих данных. Получено, что среднесуточная температура на глубине 5 м ниже температуры поверхности на дату измерений в среднем на 0.2 °C, или 0.7 % от измеренных параметров. Принимая такое условие при расчете испарения, использованы непрерывные среднесуточные значения температуры на самописце. В итоговом расчете указанная разница может быть отмечена в качестве погрешности.

Расчет испарения проводился с временным разрешением в сутки, а осреднение для анализа сезонных измерений выполнено на уровне месяца.

3.3. Модельный расчет поверхностного стока

В условиях малой площади водосборной поверхности пруда Янтарного и ограниченной натурной информации, для оценки гидрологического режима водосбора был применен метод водосборов-аналогов. Данный подход широко используется в практике гидрологических расчетов при недостатке метеорологической информации и позволяет переносить результаты расчетов, в т. ч. моделирования, или измерений с изученных водосборов на неизученные объекты со сходными физико-географическими условиями (Галахов и др., 2024; Кондратьев, Шмакова, 2018). В качестве такого аналога для водосбора Янтарного использован водосбор реки Приморской, граничащий с водосборами системы рассматриваемых прибрежных водоемов. Для этого водосбора, посредством численного моделирования (с использованием модели HYPE), произведен расчет стока для периода 2022–2024 гг. (2022 г. добавлен для необходимости «наполнения» водосбора водой до момента начала расчетов 2023 г.) Применение модели для рек Восточной и Юго-Восточной Балтики описано в работах (Domnin et al., 2018; Домнин, 2018). Калибрация и верификация стока непосредственно с водосбора р. Приморской выполнены ранее и описаны в работе (Домнин, Чубаренко, 2017).

ISSN (online): 2587-9634 / ISSN (print): 1564-2291
Океанологические исследования. 2026. Том 54. № 3. С. 38–60

4. Гидрометеорологические условия и водный баланс

4.1. Особенности режима температуры воздуха и сумм осадков

За 25-летний период (2001–2025 гг.) средняя температура воздуха составила 9.3 °С (рисунок 2). Внутригодовое распределение температуры характеризуется максимумом в июле (среднее за период – 19.4 °С) и минимумом в феврале (среднее значение – 0.9 °С). Максимальный разброс среднегодовых значений температуры воздуха составил 3.5 °С (от 7.5 °С в 2010 г. до 11.0 °С в 2020 г.). Выявлен положительный тренд, который составил +0.06 °С/год, т.е. ~1.5 °С за 25 лет (коэффициент детерминации (R^2) составил 0.37, статистическая значимость (*p-значение*) составила 0.01). Экстремально теплые погодные условия были в январе 2006 г. (средняя температура составила +6.2 °С) и в декабре 2015 г. (+5.3 °С), максимально холодным был январь 2010 г. (–6.8 °С).

Средняя годовая сумма осадков за весь период составила 545 мм. Осадки распределены неравномерно: максимум приходится на июль (67 мм), минимум – на апрель (25 мм). В холодный период выпадает 44 % годовой суммы, а в теплый – 42 %, остальное приходится на переходные месяцы апрель и октябрь. Разброс годовых сумм осадков варьировал от 380 мм (2022 г.) до 780 мм (2001 г.), при статистически выраженном отрицательном тренде 10.6 мм/год, что за весь рассматриваемый период наблюдений дало снижение 265 мм. Кроме того, можно выделить существенный сдвиг между временными периодами 2001–2012 и 2013–2024 гг. Так, средние значения годовых сумм осадков в первый период составили 625 мм в год, а во второй – только 470 мм (рисунок 2). Максимальное количество осадков зафиксировано в июле 2001 г. и августе 2005 г. (по 150 мм).

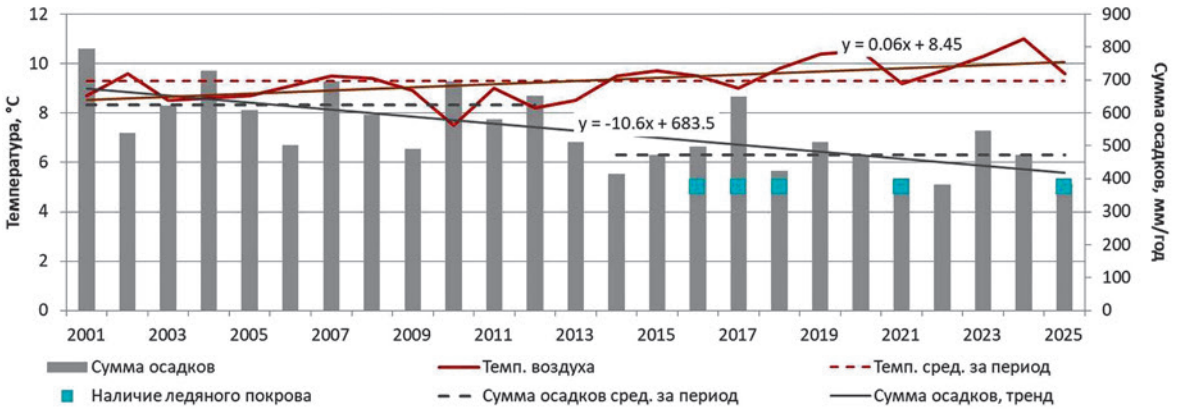


Рис. 2 – Среднегодовые значения температуры воздуха, годовые суммы осадков и их тренды на станции Балтийск за период 2001–2025 гг. Наличие ледяного покрова на поверхности пруда Янтарного в период 2016–2025 гг.

Рассматриваемые 2023 и 2024 гг. отмечаются среднегодовой температурой воздуха выше среднего (+10.3 °С и 11.0 °С соответственно). Годовая сумма осадков в 2023 г. была также выше среднего (за период 2013–2025 гг.) и составляла 546 мм, а в 2024 г. соответствовала среднему – 472 мм.

4.2. Образование ледового покрова

С использованием космических изображений за период 2015–2025 гг. были проанализированы ситуации образования ледового покрова на поверхности пруда Янтарного. В целом, формирование льда начинается только во второй половине января – начале февраля, но не каждую зиму, а продолжительность ледостава составляет 1–3 недели. За рассмотренный период лед образовывался только в 2016–2018, 2021 и 2025 гг. (рисунок 2). При этом полное покрытие акватории было зафиксировано только в 2018 и 2021 гг.

4.3. Испарение с водной поверхности

Расчет испарения выполнялся по трем эмпирическим формулам – Мейера, Ровера и Викулиной–Браславского. Использованные в настоящей работе уравнения, как и другие формулы, основанные на законе Дальтона, учитывают давление насыщенного пара (e_w зависит только от температуры воды), фактического давления пара в воздухе (e_a зависит от температуры и влажности воздуха).

Полученные временные ряды суточных значений E характеризуются чередованием положительных и отрицательных значений. Отрицательные значения возникают в случаях, когда воздух теплее воды, но влажность воздуха высокая, тогда e_a может оказаться больше e_w. Это типичная ситуация в туманные дни, в ночные часы при высокой влажности, а также в регионах с влажным морским климатом, при адвекции теплого влажного воздуха над холодной водой (например, весной, когда вода еще холодная, а воздух уже прогрелся).

В такие моменты происходит преобладание процесса конденсации над испарением, что физически соответствует потоку влаги, направленному к водной поверхности. В таких случаях абсолютное значение E трактуется как слой сконденсировавшейся влаги (Кнаке, Странский, 1959). Соответственно, при расчете параметра E правильнее говорить о потоке влаги, направленном к водной поверхности, и в итоговом уравнении этот параметр имеет знак $\pm E$.

Суммирование суточных значений позволило получить месячные и годовые величины испарения. При этом сумма суточных значений за месяц и за год дала нам положительные величины, поскольку конденсационные потери (отрицательный вклад) полностью перекрывались испарением в теплые дни и месяцы. Таким образом, годовой водный баланс пруда Янтарный характеризуется положительным суммарным испарением, но суточные значения отражают естественную внутрисезонную изменчивость направления вертикального влагообмена на границе раздела вода–атмосфера.

Суммарное испарение, рассчитанное по формуле Ровера за 2023 г., дало 680 мм, а в 2024 г. – 600 мм. Значения испарения, вычисленные по формуле Мейера, составили 1130 мм – в 2023 г. и 1000 мм – в 2024 г., что является систематическим завышением примерно в 1.7 раз. Это может быть объяснено отсутствием поправки на атмосферное давление. Годовые суммы расчетов, сделанные по уравнению Викулиной–Браславского

(формула ГГИ), имеют промежуточные значения: 900 мм в 2023 г. и 780 мм в 2024 г. (рисунок 3). Это входит в средний диапазон литературных оценок для Юго-Восточной Балтики (Дубравин, Маслянкин, 2011), где среднегодовое испарение за 1867–1955 гг. имеет вариацию в 620–660 мм в год. Соответственно, формула Ровера является предпочтительной для расчета испарения с поверхности акватории анализируемого прибрежного водоема.

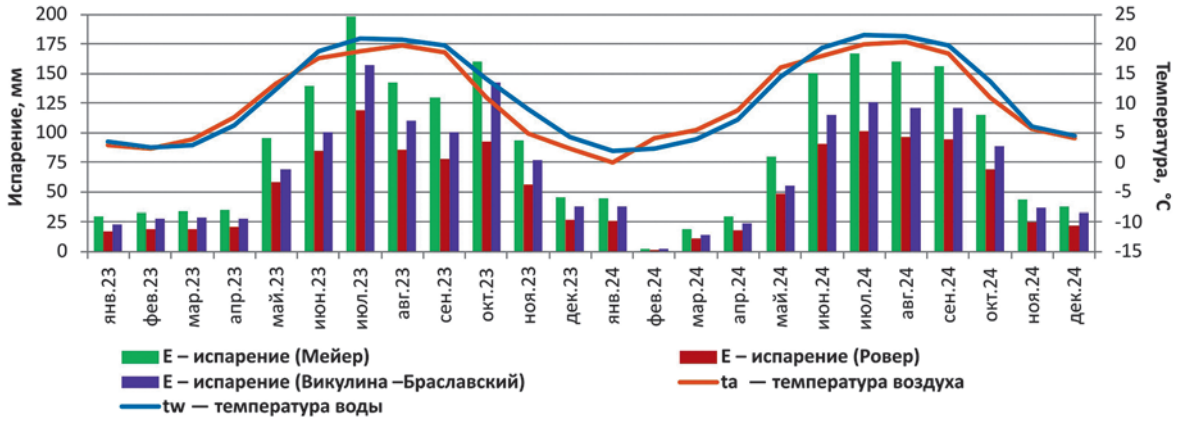


Рис. 3 – Среднемесячные значения испарения с водной поверхности пруда Янтарного, полученные путем расчета по эмпирическим формулам Мейера, Ровера и Викулиной–Браславского, и среднемесячные значения температуры воды на глубине 5 м (по данным самописца) и воздуха (на метеостанции Балтийск) для периода 2023–2024 гг.

Сезонная динамика испарения для пруда Янтарного имеет связь с температурным режимом водоема. Так, в июле, когда температура воды на самописце достигала 21.0–21.5 °С, испарение было максимальным и составило 120 мм в 2023 г. и 100 мм в 2024 г., а минимум был приурочен к февралю–марту, когда температура воды опускалась до 1.8–2.6 °С, испарение снижалось до 1.5–20 мм в месяц. При этом зимой относительная влажность (f) повышена (79–87 %), что уменьшает дефицит влажности ($e_w - e_a$) и дополнительно подавляет испарение.

4.4. Сток с водосборной площади

Для всей моделируемой территории (рисунок 1) характерна сезонная неравномерность стока с максимумом в зимне-весенний период и минимумом в летне-осенний. Просматривается устойчивая тенденция увеличения слоя стока при переходе от верхних суббассейнов к нижним в период зимне-весеннего половодья. Но в летне-осеннюю межень наблюдается обратная картина: замыкающий суббассейн характеризуется минимальными значениями стока, что связано с аккумуляцией воды в пределах вышележащих суббассейнов и, возможно, с возрастанием потерь воды, приходящейся на испарение в атмосферу и инфильтрацию в подземные горизонты по мере продвижения вниз по гидрографической сети.

Близость верхних суббассейнов реки Приморской к водосбору пруда Янтарного позволила нам использовать их в качестве наиболее репрезентативной территории для переноса результатов численного моделирования. Так, за рассматриваемый период (2022–2024 гг.) этот водосбор характеризуется ярко выраженной сезонной неравномерностью стока: зимний период (с декабря по февраль) отличается максимальными значениями (от 12 мм в декабре 2022 г. до 70 мм в январе 2024 г.), полученными за счет снеготаяния, оттепелей, увеличенного стока и минимального испарения; весной (с марта по май) наблюдается плавное уменьшение стока с 25 до 7 мм в месяц; летом (с июня по август) устанавливается устойчивая межень с минимальными значениями в 3–7 мм в месяц; а осенью (в период с сентября по ноябрь) вновь происходит постепенное увеличение стока от минимальных значений до 17 мм в месяц. При этом межгодовая изменчивость наиболее выражена в зимние и осенние месяцы, а диапазон колебаний стока за весь период расчетов составил от 1 до 70 мм в месяц. При расчете слоя стока с учетом перехода от площади водосбора (3.5 км^2) к площади водоема (1.2 км^2) использован коэффициент, равный 2.9.

4.5. Сезонная динамика элементов баланса

Определение подземной составляющей водного баланса (G_{in}/G_{out}) является наиболее сложным элементом уравнения, так как исходных данных или эмпирических расчетов для исследуемой территории нет. Но, имея данные о колебании уровня, подземный сток/отток будет представлен в виде невязки для следующего уравнения (7):

$$G_{out} - G_{in} = \pm \Delta H + E - P - Q. \quad (7)$$

Все составляющие выражены в миллиметрах слоя воды, приведенного к площади зеркала водоема, значения округлены до 10 мм. Временной ряд охватывает период с января 2023 г. по октябрь 2024 г. (рисунок 4, таблица 1).

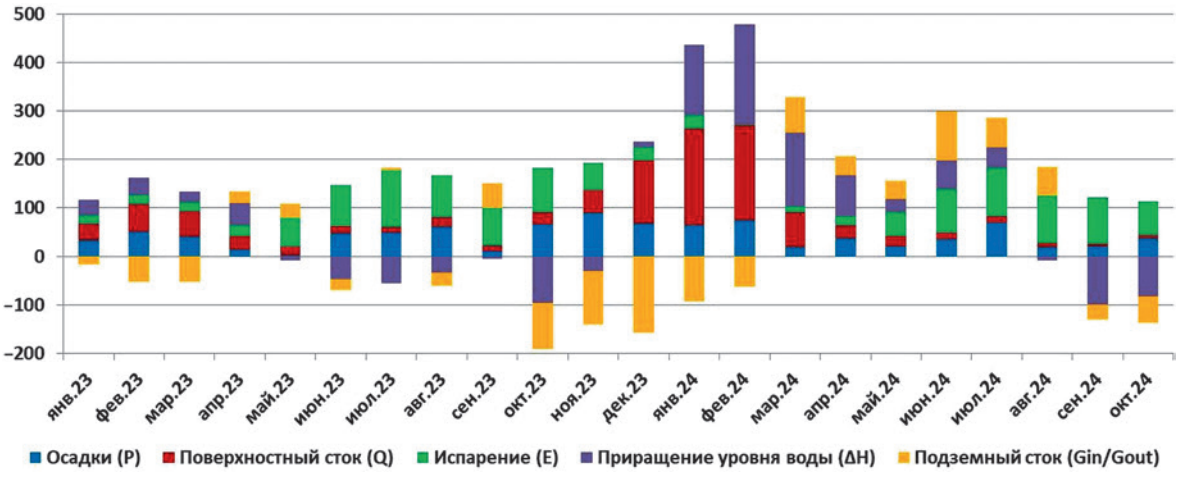


Рис. 4 – Ежемесячный ход значений составляющих водного баланса пруда Янтарного в период 2023–2024 гг.

Табл. 1 – Численные значения (с точностью в мм слоя) элементов водного баланса пруда Янтарного для периода 2023–2024 гг.

Месяц, год	Осадки (*P*)	Поверхностный сток (*Q*)	Испарение (*E*)	Приращение уровня воды (Δ*H*)	Подземный сток (G_{in}/G_{out})
янв., 2023	32	34	18	32	–17
февр., 2023	51	57	19	36	–52
март, 2023	41	51	20	21	–51
апр., 2023	14	28	21	46	25
май, 2023	2	19	58	–8	29
июнь, 2023	47	14	85	–46	–22
июль, 2023	49	10	119	–55	4
авг., 2023	61	20	86	–33	–28
сент., 2023	11	11	78	–5	51
окт., 2023	66	25	93	–97	–94
ноябрь, 2023	89	48	56	–30	–111
дек., 2023	67	131	27	12	–158
янв., 2024	63	201	26	146	–93
февр., 2024	74	196	2	207	–62
март, 2024	19	72	11	153	74
апр., 2024	36	28	18	85	39
май, 2024	21	20	49	29	36
июнь, 2024	34	14	91	59	102
июль, 2024	69	13	101	42	61
авг., 2024	20	8	96	–9	60
сент., 2024	21	6	94	–99	–31
окт., 2024	37	7	69	–82	–56

Максимальное количество осадков (*P*) зафиксировано в холодный период с ноября по март, что характерно для климата умеренных широт. Минимум осадков пришелся на теплый период с мая по сентябрь. В 2023 г. годовая сумма осадков составила 530 мм, в 2024 г. за 10 месяцев – 390 мм.

Максимальные значения поверхностного стока (*Q*) наблюдаются в зимне-весенний период (январь–март), из-за снеготаяния, обильных осадков в жидком состоянии и, соответственно, повышенной водностью рек. Летом сток минимален (6–11 мм в месяц с учетом площади водоема), что связано с сезонным уменьшением поверхностного стока, а в некоторых случаях и временным пересыханием водотоков.

Годовой ход испарения, рассчитанного по формуле Ровера, четко выражен с максимумом в июле (120 мм) и минимумом в феврале–марте (до 20 мм). Средняя годовая сумма испарения (за 2023–2024 гг.) составила 640 мм, что согласуется с литературными оценками для юго-восточной части Балтийского региона (Дубравин, Маслянкин, 2011).

В 2023 г. наблюдалось общее понижение уровня воды (Δ*H*) на 130 мм, что обусловлено превышением расходной части баланса над приходной (прежде всего за счет испарения). Наиболее интенсивное падение уровня зафиксировано в октябре (около −100 мм) и июле (−50 мм). В январе–феврале 2024 г. отмечен резкий подъем уровня (+150 и +210 мм соответственно), что может быть связано со штормовыми условиями осени–зимы 2023/2024 гг. (Domnin et al., 2024), а именно с обильными осадками и увеличенным поверхностным притоком.

4.6. Подземная составляющая водного баланса

В подземном стоке (G_{in}/G_{out}) пруда Янтарного, рассчитанном как остаточный член уравнения, проявляется существенная сезонная и межгодовая изменчивость (рисунок 4). В 2023 г. сумма значений подземной составляющей составила –420 мм, что свидетельствует об оттоке подземных вод; а в основном положительные значения 2024 г. определяют приток подземных вод, что за 10 месяцев дало +130 мм.

При анализе подземной составляющей G водного баланса пруда Янтарный проявляется сезонная закономерность. Так, в холодный период (ноябрь–март) водоем является источником питания подземных вод (среднемесячный отток –80 мм, с максимумом –158 мм в декабре 2023 г.), что должно быть обусловлено промерзанием почвы и снижением инфильтрационной способности водосбора. В теплый же период (апрель–октябрь) подземный сток меняется на противоположный – пруд получает подземное питание (среднемесячные значения +20 мм, а максимум +102 мм в июне 2024 г.), что связано с повышением уровня грунтовых вод за счет инфильтрации атмосферных осадков. Данная динамика свидетельствует о высокой гидравлической связи водоема с окружающими водоносными горизонтами и его значительной роли в локальном гидрогеологическом режиме.

Для оценки взаимосвязи между изменением уровня воды в пруду (ΔH) и компонентами водного баланса (P, E, Q, G_{in}/G_{out}) был выполнен корреляционный анализ. Учитывая инерционный характер фильтрационных процессов, анализ выполнялся с временным сдвигом ряда изменения уровня (ΔH) относительно фиксированного ряда данных компонентов P, E, Q, G_{in}/G_{out}. Сдвиг выполнялся таким образом, чтобы значения компонентов всегда предшествовали значению уровня (рисунок 5, таблица 2).

Корреляционный анализ выявил различное время реакции уровня воды на изменение компонентов водного баланса. Поверхностный сток (Q) оказывает наиболее сильное влияние на уровень с опережением в 1 месяц ($r = 0.87$, $R^2 = 0.76$), что отражает время добегания воды по водосбору. Испарение (E) действует практически синхронно с колебаниями уровня ($r = -0.70$, $R^2 = 0.49$), что соответствует прямому воздействию на водную поверхность. Взаимосвязь количества осадков (P) с уровнем минимальна из всех компонентов, максимальная корреляция достигается при сдвиге на 2 месяца ($r = 0.47$, $R^2 = 0.22$), что обусловлено временем формирования стока. Наибольшая инерционность характерна для подземного стока (G), максимальная отрицательная связь с уровнем достигается при сдвиге на 2 месяца ($r = -0.68$, $R^2 = 0.46$), что указывает на запаздывание фильтрационных процессов. Таким образом, ведущим фактором, определяющим внутригодовую динамику уровня, является поверхностный сток, в то время как подземный сток и осадки вносят вклад с существенным временным запаздыванием. Это указывает на значительную буферную емкость водоносных горизонтов, связывающих озеро с окружающей территорией, и подтверждает необходимость учета временных сдвигов при оценке водного баланса подобных водоемов. Полученный сдвиг можно менять в зависимости от заданного диапазона осреднения/суммирования суточных значений – месяц, декада, неделя.

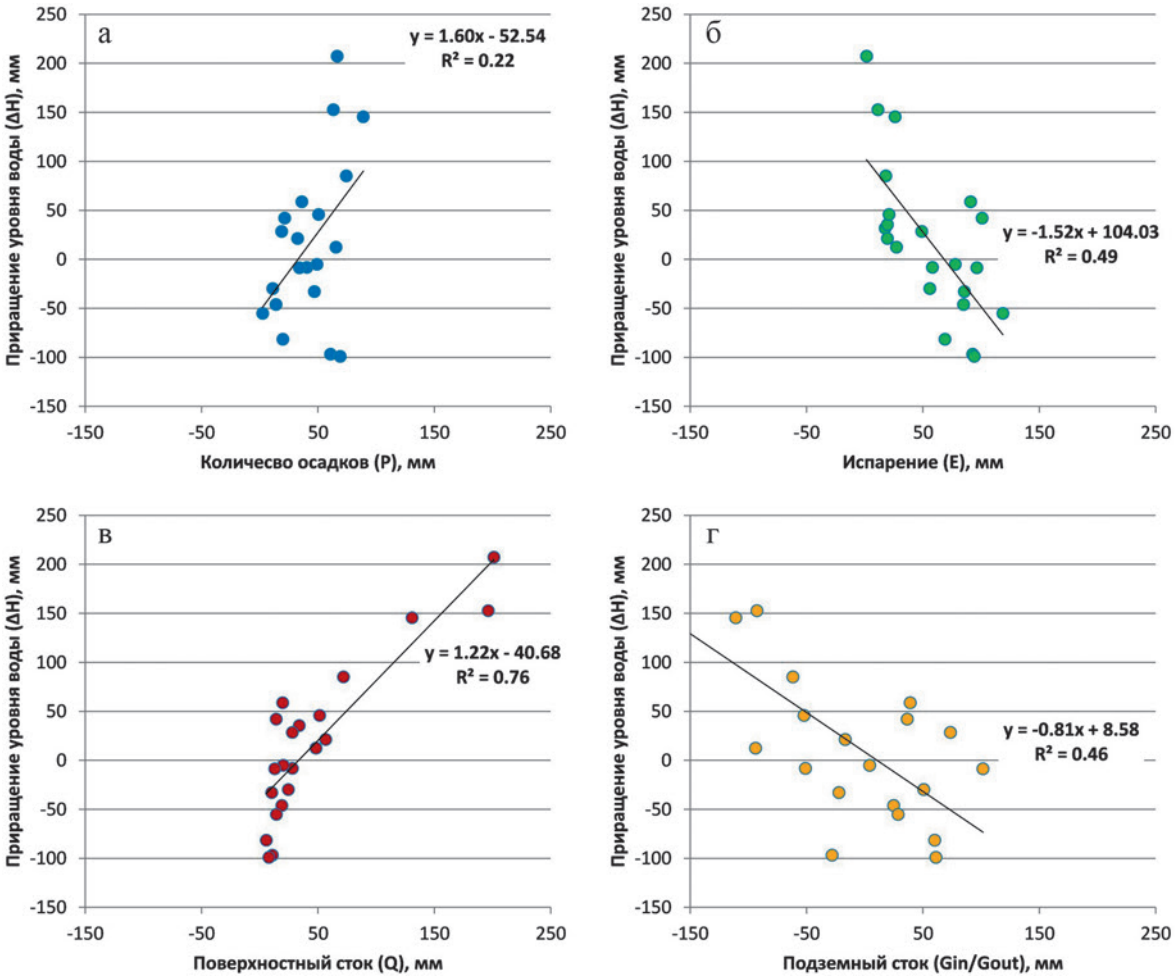


Рис. 5 – Соотношения значений приращения уровня воды (ΔH) со значениями компонентов водного баланса – осадков, *P* (**а**), испарения, *E* (**б**), поверхностного стока, *Q* (**в**) и подземного стока, G_{in}/G_{out} (**г**) пруда Янтарного при максимальной корреляции

Табл. 2 – Кросс-корреляционная матрица между компонентами водного баланса (*P, E, Q,* G_{in}/G_{out}) и приращением уровня воды (Δ*H)*

Компонент водного баланса	***r***			***R*²**		
	без сдвига	**сдвиг на 1 месяц**	**сдвиг на 2 месяца**	**без сдвига**	**сдвиг на 1 месяц**	**сдвиг на 2 месяца**
Кол-во осадков (*P*)	0.08	0.44	0.47	0.01	0.19	0.22
Испарение (*E*)	–0.70	–0.68	–0.54	0.49	0.46	0.29
Поверхностный сток (*Q*)	0.70	0.87	0.71	0.50	0.76	0.50
Подземный сток (G_{in}/G_{out})	0.18	–0.41	–0.68	0.03	0.17	0.46

5. Выводы

По результатам комплексного анализа натурных данных (2023–2024 гг.) и численных расчетов для бессточного водоема прибрежной зоны Юго-Восточной Балтики – пруда Янтарного – установлены количественные характеристики водного баланса, выявлена особая роль подземной составляющей в межгодовой динамике уровня.

Апробирование общепринятых эмпирических уравнений испарения (Мейера, Ровера, Викулиной–Браславского) и расчеты по ним с количественными оценками всех переменных для водной поверхности пруда Янтарного показали, что для условий прибрежных водоемов Юго-Восточной Балтики наиболее физически обоснованные результаты дает уравнение Ровера. Годовая сумма испарения, рассчитанная по нему, составила 680 мм в 2023 г. и 600 мм (за неполный год) в 2024 г.; формула Мейера систематически завышает испарение в 1.7 раза; а значения, рассчитанные по формуле Викулиной–Браславского, занимают промежуточное положение. Сезонный ход испарения привязан к температуре воды: максимум в июле (120 мм при 21.5 °C), минимум в феврале–марте (до 20 мм при 1.8–2.6 °C). Высокая относительная влажность зимой (79–87 %) дополнительно снижает испарение за счет уменьшения ее дефицита.

Поверхностный сток с водосбора пруда Янтарного, оцененный с использованием численной модели HYPE посредством метода водосборов-аналогов, характеризуется сезонной неравномерностью. При том, что максимальный сток, обеспеченный за счет обильных осадков и минимального испарения с поверхности суши, зафиксированный в январе–феврале, составил до 70 мм в месяц, сток в летнюю межень составил лишь 3–7 мм в месяц. Количество осадков в 2023 г. составило 530 мм, а за 10 месяцев 2024 г. – 390 мм.

Для рассматриваемого водоема впервые оценена подземная составляющая, как невязка уравнения водного баланса. Установлено, что подземный водообмен характеризуется выраженной сезонной и межгодовой изменчивостью. А именно, в 2023 г. отток подземных вод из пруда составил –420 мм, но в 2024 г. уже приток подземных вод был +130 мм. Такое значительное различие может быть обусловлено разными факторами: емкостью водоносного горизонта – грунтовые воды накапливаются в нем и стекают в водоем, а потом из него не мгновенно, а с задержкой; сезонным накоплением – например, осенние дожди повышают уровень грунтовых вод, но это влияние доходит до озера только через 1–2 месяца; а также буферной емкостью системы водоем – подземные воды. Отрицательный знак коэффициента корреляции между подземной составляющей (G) и изменением уровня воды (ΔH) указывает на то, что повышение уровня воды в озере приводит к усилению разгрузки вод пруда Янтарного в подземные горизонты (увеличению оттока, $G < 0$). Таким образом, подземный водообмен в исследованный период был преимущественно дренирующим фактором, выводящий воду из котловины, особенно в многоводные периоды, с характерным временем запаздывания около 2 месяцев.

Оценки водного баланса водоемов Калининградской области проводились крайне редко. Так, например, подобные работы для Куршского и Калининградского/Вислинского

заливов были выполнены в 2008 г. (Chubarenko et al., 2017), однако подземная составляющая для них была использована из еще более ранних источников (Силич, 1971). В настоящей же работе пруд Янтарный выступил в качестве природного «лотка», для которого, на основе измерений и численных расчетов, получены базовые оценки компонентов водного баланса, включая подземную составляющую. Полученные результаты могут быть использованы в методическом и сравнительном аспектах при проведении региональных оценок водного баланса, в т. ч. моделирования, для других прибрежных водоемов Калининградской области.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

Список литературы

1. *Дубравин В. Ф., Маслянкин Г. Е.* Атлас пресноводного баланса Балтийского моря. Калининград: Атлант. отд-ние Ин-та океанол., 2011. 138 с. https://atlantic.ocean.ru/images/publ/atlas_pecnovodnogo_dubravin_19_11_2012.pdf
2. *Болгов М. В., Бубер А. Л., Коробкина Е. А., Любушин А. А., Филиппова И. А.* Озеро Байкал: экстремальные уровни как редкое гидрологическое событие // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 392–406. EDN: YRWHSB. https://doi.org/10.7868/S0321059617030063
3. *Бородулина Г. С.* Роль подземного стока в формировании химического состава воды озер бассейна Онежского озера // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2011. №. 4. С. 108–115. EDN: OHSKEB
4. *Галахов В. П., Губарев М. С., Назаров А. Н.* Водный баланс бессточных озерно-речных систем Обь-Иртышского междуречья (в пределах Алтайского края). Барнаул: Алтайский государственный университет, 2010. 112 с. ISBN: 978-5-7904-1039-0. EDN: QBFTCB
5. *Галахов В. П., Самойлова С. Ю., Ловцкая О. В., Мардасова Е. В.* Бассейны-аналоги как способ расчетов объема весеннего половодья в условиях недостатка метеорологической информации (на примере реки Тубы) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 2. С. 120–132. EDN: UNFZJW. https://doi.org/10.18799/24131830/2024/2/4257
6. *Догановский А. М., Мякишева Н. В.* Водный баланс и внешний водообмен озер России и сопредельных территорий // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 41. С. 63–75. EDN: VTRICH
7. *Домнин Д. А., Чубаренко Б. В.* Оценка выноса биогенных веществ с малых водосборных бассейнов Калининградского/Вислинского залива посредством численного моделирования // Известия КГТУ. 2017. № 46. С. 13–23. EDN: ZCICLB
8. *Домнин Д. А.* Многолетние и внутригодовые изменения стока воды с российской части бассейна реки Западная Двина как отклик на колебания климатических параметров // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 51. С. 63–70. EDN: XZTPYL
9. *Домнин Д. А., Кондрашов А. А., Немцов М. И., Корж А. О.* Измерение колебаний уровня воды в бессточном водоеме с использованием гидростатического уровнемера // Материалы II Международной научно-практической конференции «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития». 20–22 марта 2024 г. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2024. С. 214–218. EDN: CXVNER
10. *Домнин Д. А., Михневич Г. С., Вершинин Д. С., Карманов К. В., Гмыря Е. И.* Условия взаимодействия морских и пресных вод в системе прибрежных обводненных карьеров

Юго-Восточной Балтики // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165. Кн. 3. С. 467–485. EDN: JOOPWJ. https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.3.467-485
11. *Кнаке О., Странский И. Н.* Механизм испарения // Успехи физических наук. 1959. Т. 68. № 6. С. 261–305. https://ufn.ru/ufn59/ufn59_6/Russian/r596c.pdf
12. *Кондакова О. В., Савкин В. М., Двуреченская С. Я., Марусин К. В.* Водный баланс и характеристики минерализации бессточного озера Чаны // География и природные ресурсы. 2020. № 1. С. 122–129. EDN: FTKYZX. http://dx.doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-1(122-129)
13. *Кондратьев С. А., Шмакова М. В.* Гидродинамический режим мелководного водоема: опыт математического моделирования // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. №. 52. С. 88–101. EDN: YKWQWT
14. *Монкаева Г. Е.* Влияние современного изменения климата на испарение с водной поверхности в Иле-Балкашском бассейне // География и водные ресурсы. 2024. № 3. С. 140–156. EDN: FOJBGA. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-139-154.32
15. *Мякишева Н. В., Бирюкова В. А.* Разномасштабная изменчивость уровня воды в озерах России. I. Озера Арктической зоны // Естественные и технические науки. 2018. № 12. С. 181–187. EDN: SORCDV
16. *Силич М.* Водный баланс залива // Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Лазаренко Н., Маевского А. Л: Гидромеоиздат, 1971. С. 143–172.
17. *Хубларян М. Г., Фролов А. П., Юшманов И. Ю.* Интрузия морских вод в прибрежные водоносные горизонты // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 3. С. 288–301. EDN: IJWJGP
18. *Bengtsson L.* Water Balance of Lakes // Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Dordrecht: Springer. 2012. P. 863–864. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_18
19. *Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S., Stont Zh., Chechko V., Bobykina V., Pilipchuk V., Karmanov K., Domnina A., Bukanova T., Topchaya V., Kileso A.* Transboundary lagoons of the Baltic Sea // The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World / R. Kosyan (ed.) Springer 6 Switzerland. 2017. P. 149–191. EDN: ZIUFEG. https://doi.org/10.1007/978-3-319- 43392-9_6
20. *Cieśliński R., Olszewska A.* New insight into defining the lakes of the southern Baltic coastal zone // Environmental Monitoring and Assessment. 2018. Vol. 190. No. 102. EDN: RAVHMX. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6447-8
21. Copernicus Sentinel-2 (processed by ESA), MSI Level-1C TOA Reflectance Product. Collection 1. European Space Agency. 2021. https://doi.org/10.5270/S2_-742ikth
22. *Dhada I., Poonam Singha S., Shukla A. K.* Sustainable application of edible solute to control reservoir evaporation loss // Scientific Reports. 2025. No. 15 (1). Art. 44550. EDN: XBILNO. https://doi.org/10.1038/s41598-025-28224-x
23. *Djikic A., Marjanovic J., Djokic J.* Modelling winter wheat soil water balance in changing climatic conditions // Agriculture and Forestry. 2024. No. 70 (2). P. 93–106. EDN: BKNTYY. https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.2.07
24. *Domnin D., Chubarenko B., Capell R.* Formation and Re-Distribution of the River Runoff in the Catchment of the Pregolya River // The Handbook of Environmental Chemistry. Vol. 65. Springer International Publishing AG. 2018. P. 269–284. EDN: XXEFPF. https://doi.org/10.1007/698_2017_97
25. *Domnin D., Kileso A., Kulmanov K., Rachipa V.* Response of Hydrological Characteristics for Local Coastal Water Bodies of the South-Eastern Baltic to Extreme Weather Events in Autumn–Winter 2023/2024 // Pure and Applied Geophysics. 2024. Vol. 181. P. 2403–2420. EDN: CVGXSV. https://doi.org/10.1007/s00024-024-03526-9
26. *Harvey F. E., Rudolph D. L., Frape S. K.* Measurement of hydraulic properties in deep lake sediments using a tethered pore pressure probe: Applications in the Hamilton Harbour, western Lake Ontario // Water Resour. Res. 1997. No. 33 (8). P. 1917–1928. https://doi.org/10.1029/97WR00659

27. *Ivkina N. I.* Water level variation on the Balkhash in the modern period // Гидрометеорология и экология. 2022. № 3 (106). С. 6–13. EDN: SPFBMZ. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2022-106-3-6-13
28. *Jain S. K.* Climate change and water resources // Yojana Journal. 2016. Vol. 60. P. 55–59. https://afeias.com/wp-content/uploads/2016/08/yojana-english.pdf
29. *Jeppesen E., Meerhoff M., Davidson T. A., Trolle D., Sondergaard M., Lauridsen T. L., Beklioglu M., Brucet S., Volta P., Gonzalez-Bergonzoni I., Nielsen A.* Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes // Journal of Limnology. 2014. Vol. 73. P. 88–111. EDN: USYUED. https://doi.org/10.4081/jlimnol.2014.844
30. *Jiang W., Liu B., Li Y., Li W., Chen J., Deng Y., ... Shu L.* Unravelling groundwater budget in the Poyang floodplain system under intensifying seasonal lake inundation // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2024. Vol. 54. Art. 101866. EDN: JBYWQX. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101866
31. *Kuang X. et al.* The changing nature of groundwater in the global water cycle // Science. 2024. Vol. 383. No. 6686. P. eadf0630. EDN: KXNAFA. https://doi.org/10.1126/science.adf0630
32. *La Fuente S., Jennings E., Lenters J. D., Verburg P., Tan Z., Perroud M., Janssen A. B. G., Woolway R. I.* Ensemble modeling of global lake evaporation under climate change // Journal of Hydrology. 2024. Vol. 631. P. 130647. EDN: MQOWNS. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130647
33. *Lewandowski J., Rosenberry D. O., Meinikmann K.* Groundwater–Lake interfaces // Ecohydrological Interfaces. Wiley. 2024. P. 103–122. https://doi.org/10.1002/9781119489702.ch5
34. *Lundgren R. F., York B. C., Stroh N. A., Vecchia A. V.* Water-balance modeling of selected lakes for evaluating viability as long-term fisheries in Kidder, Logan, and Stutsman Counties, North Dakota: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2019–5007. 2019. 22 p. https://doi.org/10.3133/sir20195007
35. *Martin M. E., Campodonico V. A., Lecomte K. L. Pasquini A. I.* Assessing groundwater-surface water interactions in shallow lakes under anthropogenic stress (Pampa plain, South America): a hydrochemical and isotopic approach // Groundwater for Sustainable Development. 2025. Vol. 30. Art. 101475. EDN: UHEEHO. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101475
36. *Matusiak M., Marciniak M., Owsianny P., Dragon K.* The investigation of the lake water/groundwater interaction in the hyporheic zone of a groundwater-dependent lake (Lake Płotki, Poland) // Quaestiones Geographicae. 2025. Vol. 44 (3). P. 111–122. EDN: XEEMHK. https://doi.org/10.14746/quageo-2025-0025
37. *Oertel G. F.* Coastal Lakes and Lagoons / Schwartz M. L. (ed.) // Encyclopedia of Coastal Science. Earth Sci. Ser. 2005. Vol. 14. Springer, Dordrecht. P. 263–266. https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_81
38. *Piccolroaz S., Zhu S., Ladwig R., Carrea L., Oliver S., Piotrowski A. P. Ptak M., Shinohara R., Sojka M., Woolway R. I., Zhu D. Z.* Lake water temperature modeling in an Era of climate change: Data sources, models, and future prospects // Reviews of Geophysics. 2024. Vol. 62. P. e2023RG000816. EDN: EHDLVZ. https://doi.org/10.1029/2023RG000816
39. Reliable Prognosis // https://rp5.ru/Weather_in_the_world (дата обращения 07.03.2026).
40. *Rosenberry D. O., Lewandowski J., Meinikmann K., Nützmann G.* Groundwater – the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 1: effects of groundwater on hydrology // Hydrological Processes. 2015. No. 29. P. 2895–2921. https://doi.org/10.1002/hyp.10403
41. *Shiklomanov I. A.* Climate and water resources // Hydrological sciences journal. 1989. Vol. 34. No. 5. P. 495–529. EDN: XOBCMK. https://doi.org/10.1080/02626668909491359
42. *Sonntag D.* Important new values of the physical constants of 1986, vapor pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae // Z. Meteorol. 1990. No. 70. P. 340–344. https://cir.nii.ac.jp/crid/1571417126635965952

43. *Tóth J.* Groundwater discharge: a common generator of diverse geologic and morphologic phenomena // Hydrological Sciences Journal. 1971. Vol. 16 (1). P. 7–24. https://doi.org/10.1080/02626667109493029
44. *Winter T. C., Harvey J. W., Franke O. L., Alley W. M.* Ground Water and Surface Water: A Single Resource. Denver: U. S. Geological Survey. 1998. 89 p. https://doi.org/10.3133/cir1139
45. *Woolway R. I., Kraemer B. M., Lenters J. D., Merchant C. J., O'Reilly C. M., Sharma S.* Global lake responses to climate change // Nature reviews earth & environment. 2020. Vol. 1 (8). P. 388–403. EDN: VMRRKX. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5
46. *Zhang S., Chen C., Tang H., Jin G., Zhou B., Yuan H., Chen H.* Solute transport characteristics at the lakebed sediment-water interface due to multiple influences of dual seasonal lakes // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 918. Art. 170284. EDN: LTVEOR. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170284

Статья поступила в редакцию 20.07.2026, одобрена к печати 30.08.2026.
Для цитирования: *Домнин Д. А.* Восстановление компонентов водного баланса по данным натурных наблюдений и модельных оценок для малого бессточного водоема прибрежной зоны моря // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 3. С. 38–60. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).3

RECONSTRUCTION OF WATER BALANCE COMPONENTS BASED ON FIELD OBSERVATIONS AND MODEL ESTIMATES FOR A SMALL CLOSED COASTAL LAKE

D. A. Domnin

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: dmitriy.domnin@atlantic.ocean.ru

Based on a comprehensive analysis of field data (2023–2024) and numerical estimations, the water balance of a closed coastal water body in the south-eastern Baltic – the Yantarny Pond (Kaliningrad Oblast, Russia) – has been calculated. Quantitative characteristics were obtained for all major balance components: precipitation, evaporation, surface runoff, and groundwater flow. Three empirical evaporation formulae (Meyer, Rohwer, and Vikulina–Braslavsky) were tested for the conditions of the study area; the Rohwer equation was shown to provide the most physically sound results. Annual evaporation according to this formula amounted to 680 mm in 2023 and 600 mm in 2024 (for a partial year). Surface runoff from the catchment, estimated using the HYPE model, exhibits pronounced seasonal variation, ranging from 70 mm/month in winter to 3–7 mm/month during the summer low-flow period. For the first time, a quantitative assessment of the groundwater component of the water balance was obtained for this water body using the residual method. A pronounced interannual variability of groundwater exchange was revealed: in 2023, groundwater outflow from the pond prevailed (–420 mm), while in 2024, groundwater inflow was recorded (+130 mm). This difference is attributed to the inertia of filtration processes and the buffering capacity of the "lake – groundwater" system. Correlation analysis revealed a lagged response of the water level to changes in groundwater flow, with a characteristic response time of about two months. The results obtained may serve as a methodological framework for regional assessments of water balance in other coastal water bodies of the Kaliningrad Oblast'.

Keywords: water balance, groundwater exchange, South-Eastern Baltic Sea, Kaliningrad Oblast, Yantarniy Pond

Acknowledgements: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0025).

References

1. Bengtsson, L., 2012: Water Balance of Lakes. Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Dordrecht: Springer, 863–864, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_18
2. Bolgov, M. V., A. L. Buber, E. A. Korobkina, A. A. Lyubushin, and I. A. Filippova, 2017: Ozero Baykal: ekstremal'nyye urovni, kak redkoye gidrologicheskoye sobytiye (Lake Baikal: extreme levels as a rare hydrological event). *Water Resources,* **44** (3), 392–406, https://doi.org/10.7868/S0321059617030063
3. Borodulina, G. S., 2011: Rol' podzemnogo stoka v formirovanii khimicheskogo sostava vody ozer basseyna Onezhskogo ozera (The role of groundwater runoff in the formation of chemical composition of lake waters in the Lake Onega basin). *Proceedings of the Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,* **4**, 108–115, EDN: OHSKEB
4. Chubarenko, B., D. Domnin, S. Navrotskaya., Zh. Stont, V. Chechko, V. Bobykina, V. Pilipchuk, K. Karmanov, A. Domnina, T. Bukanova, V. Topchaya, and A. Kileso, 2017: *Transboundary lagoons of the Baltic Sea. The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World*, R. Kosyan (ed.), Springer, 6, Switzerland, 149–191, https://doi.org/10.1007/978-3-319- 43392-9_6
5. Cieśliński, R., and A. Olszewska, 2018: New insight into defining the lakes of the southern Baltic coastal zone. *Environmental Monitoring and Assessment,* **190**, 102, https://doi.org/10.1007/s10661-017-6447-8
6. *Copernicus Sentinel-2* (processed by ESA), 2021: MSI Level-1C TOA Reflectance Product. Collection 1. European Space Agency, https://doi.org/10.5270/S2_-742ikth
7. Dhada, I., S. Poonam Singha, and A. K. Shukla, 2025: Sustainable application of edible solute to control reservoir evaporation loss. *Scientific Reports,* **15** (1), 44550, https://doi.org/10.1038/s41598-025-28224-x
8. Djikic, A., J. Marjanovic, and J. Djokic, 2024: Modelling winter wheat soil water balance in changing climatic conditions. *Agriculture and Forestry,* **70** (2), 93–106, https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.2.07
9. Doganovsky, A. M. and N. V. Myakisheva, 2015: Vodnyy balans i vneshniy vodoobmen ozer Rossii i sopredel'nykh territoriy (Water balance and external water exchange of lakes in Russia and adjacent territories). *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta,* **41**, 63–75, EDN: VTRICH
10. Domnin, D. A., 2018: Long-term and within-year variability of runoff from the Russian part of the catchment area of the Western Dvina River, as a response to fluctuations in climatic parameters. *Uchenyye zapiski of the Russian State Hydrometeorological University,* **51**, 63–70, EDN: XZTPYL
11. Domnin, D. A., A. A. Kondrashov, M. I. Nemtsov, and A. O. Korzh, 2024: Izmereniye kolebaniy urovnya vody v besstochnom vodoyome s ispol'zovaniyem gidrostaticheskogo urovnemera (Measurement of water level fluctuations in a closed-basin water body using a hydrostatic level recorder). *Hydrometeorology and Atmospheric Physics: Current Achievements and Development*

Trends: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, March 20–22, Saint Petersburg, Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 214–218, EDN: CXVNER

12. Domnin, D., B. Chubarenko, and R. Capell, 2018: Formation and Re-Distribution of the River Runoff in the Catchment of the Pregolya River. *The Handbook of Environmental Chemistry,* **65**, Springer International Publishing AG, 269–284, EDN: XXEFPF, https://doi.org/10.1007/698_2017_97
13. Domnin, D., A. Kileso, K. Kulmanov, and V. Rachipa, 2024: Response of Hydrological Characteristics for Local Coastal Water Bodies of the South-Eastern Baltic to Extreme Weather Events in Autumn–Winter 2023/2024. *Pure and Applied Geophysics,* **181**, 2403–2420, https://doi.org/10.1007/s00024-024-03526-9
14. Domnin, D. A. and B. V. Chubarenko, 2017: Otsenka vynosa biogennyh veshchestv s malyh vodosbornyh basseynov Kaliningradskogo/Vislinskogo zaliva posredstvom chislennogo modelirovaniya (Assessment of nutrient export from small catchments of the Kaliningrad/Vistula Lagoon through numerical modeling). *Izvestiya KGTU = KSTU News,* **46**, 13–23, EDN: ZCICLB
15. Domnin, D. A., G. S. Mikhnevich, D. S. Vershinin, K. V. Karmanov, and E. I. Gmyrya, 2023: Conditions for the interaction of marine and fresh waters in the system of coastal flooded quarries in the Southeastern Baltic. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki,* **165**, 3, 467–485, EDN: JOOPWJ, https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.3.467-485
16. Dubravin, V. F. and G. E. Maslyankin, 2011: *Atlas presnovodnogo balansa Baltiyskogo moray (Atlas of the freshwater balance of the Baltic Sea).* Kaliningrad, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, 138 p., https://atlantic.ocean.ru/images/publ/atlas_pecnovodnogo_dubravin_19_11_2012.pdf
17. Galakhov, V. P., M. S. Gubarev, and A. N. Nazarov, 2010: *Vodnyy balans besstochnykh ozorno-rechnykh sistem Ob'-Irtyshskogo mezhdurech'ya (v predelakh Altayskogo kraya) (Water balance of closed lake-river systems of the Ob-Irtysh interfluve (within the Altai Krai).* Barnaul, Altai State University, 112 p., ISBN: 978-5-7904-1039-0, EDN: QBFTCB
18. Galakhov, V. P., S. Yu. Samoilova, O. V. Lovtskaya, and E. V. Mardasova, 2024: Basin-analogy for calculating spring flood volumes at insufficiency of meteorological data (Tuba river as a case study). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering,* **335** (2), 120–132, EDN: UNFZJW, https://doi.org/10.18799/24131830/2024/2/4257
19. Harvey, F. E., D. L. Rudolph, and S. K. Frape, 1997: Measurement of hydraulic properties in deep lake sediments using a tethered pore pressure probe: Applications in the Hamilton Harbour, western Lake Ontario. *Water Resour. Res.,* **33** (8), 1917–1928, https://doi.org/10.1029/97WR00659
20. Ivkina, N. I., 2022: Water level variation on the Balkhash in the modern period. *Hydrometeorology and Ecology,* **3** (106), 6–13, EDN: SPFBMZ, https://doi.org/10.54668/2789-6323-2022-106-3-6-13
21. Jain, S. K., 2016: Climate change and water resources: *Yojana Journal,* **60**, 55–59, https://afeias.com/wp-content/uploads/2016/08/yojana-english.pdf
22. Jeppesen, E., M. Meerhoff, T. A. Davidson, D. Trolle, M. Sondergaard, T. L. Lauridsen, M. Beklioglu, S. Brucet, P. Volta, I. Gonzalez-Bergonzoni, and A. Nielsen, 2014: Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. *Journal of Limnology,* **73**, 88–111, EDN: USYUED, http://doi.org/10.4081/jlimnol.2014.844
23. Jiang, W., B. Liu, Y. Li, W. Li, J. Chen, Y. Deng, ... and L. Shu, 2024: Unravelling groundwater budget in the Poyang floodplain system under intensifying seasonal lake inundation. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **54**, 101866, EDN: JBYWQX, https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101866
24. Khublaryan, M. G., A. P. Frolov, and I. O. Yushmanov, 2008: Seawater intrusion into coastal aquifers. *Water Resources,* **35**, 274–286, EDN: IJWJGP, https://doi.org/10.1134/S0097807808030032
25. Knake, O. and I. N. Stransky, 1959: Mehanizm ispareniya (The mechanism of evaporation). *Uspekhi fizicheskikh nauk,* **68**, 6, 261–305, https://ufn.ru/ufn59/ufn59_6/Russian/r596c.pdf

26. Kondakova, O. V., V. M. Savkin, S. Ya. Dvurechenskaya, and K. V. Marusin, 2020: Vodnyj balans i harakteristiki mineralizatsii besstochnogo ozera Chany (Water balance and mineralization characteristics of the closed Lake Chany). *Geography and Natural Resources,* **1**, 122–129, http://dx.doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-1(122-129)
27. Kondratyev, S. A. and M. V. Shmakova, 2024: The hydrodynamic regime of a shallow water body: experience of mathematical modeling. *Uchenyye zapiski of the Russian State Hydrometeorological University,* **52**, 88–101, EDN: YKWQWT
28. Kuang, X. et al., 2024: The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science,* **383**, 6686, eadf0630, EDN: KXNAFA, https://doi.org/10.1126/science.adf0630
29. La Fuente, S., E. Jennings, J. D. Lenters, P. Verburg, Z. Tan, M. Perroud, A. B. G. Janssen, and R. I. Woolway, 2024: Ensemble modeling of global lake evaporation under climate change. *Journal of Hydrology,* **631**, 130647, EDN: MQOWNS, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130647
30. Lewandowski, J., D. O. Rosenberry, and K. Meinikmann, 2024: Groundwater–Lake interfaces. *Ecohydrological Interfaces,* Wiley, 103–122, https://doi.org/10.1002/9781119489702.ch5
31. Lundgren, R. F., B. C. York, N. A. Stroh, and A. V. Vecchia, 2019: Water-balance modeling of selected lakes for evaluating viability as long-term fisheries in Kidder, Logan, and Stutsman Counties, North Dakota, U.S. *Geological Survey Scientific Investigations Report 2019–5007*, 22 p., https://doi.org/10.3133/sir20195007
32. Martin, M. E., V. A. Campodonico, K. L. Lecomte, and A. I. Pasquini, 2025: Assessing groundwater-surface water interactions in shallow lakes under anthropogenic stress (Pampa plain, South America): a hydrochemical and isotopic approach. *Groundwater for Sustainable Development,* **30**, 101475, EDN: UHEEHO, https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101475
33. Matusiak, M., M. Marciniak, P. Owsianny, and K. Dragon, 2025: The investigation of the lake water/groundwater interaction in the hyporheic zone of a groundwater-dependent lake (Lake Płotki, Poland). *Quaestiones Geographicae,* **44** (3), 111–122, EDN: XEEMHK, https://doi.org/10.14746/quageo-2025-0025
34. Monkayeva, G. Ye., 2024: Vliyanie sovremennogo izmeneniya klimata na ispareniye s vodnoy poverhnosti v Ile-Balkhasskom basseyne (Impact of modern climate change on evaporation from water surface in the Ile-Balkhash basin). *Geography and Water Resources,* **3**, 140–156, EDN: FOJBGA, https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-139-154.32
35. Myakisheva, N. V. and V. A. Biryukova, 2018: Raznomasshtabnaya izmenchivost' urovnya vody v ozerah Rossii. I. Ozera Arkticheskoy zony (Multiscale water level variability in lakes of Russia. I. Lakes of the Arctic zone). *Natural and Technical Sciences,* **12**, 181–187, EDN: SORCDV
36. Oertel, G. F., 2005: Coastal Lakes and Lagoons. M. L. Schwartz (ed.) *Encyclopedia of Coastal Science. Earth Sci. Ser.,* 14, Springer, Dordrecht, 263–266, https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_81
37. Piccolroaz, S., S. Zhu, R. Ladwig, L. Carrea, S. Oliver, A. P. Piotrowski, M. Ptak, R. Shinohara, M. Sojka, R. I. Woolway, and D. Z. Zhu, 2024: Lake water temperature modeling in an Era of climate change: Data sources, models, and future prospects. *Reviews of Geophysics,* **62**, e2023RG000816. EDN: EHDLVZ, https://doi.org/10.1029/2023RG000816
38. *Reliable Prognosis*, https://rp5.ru/Weather_in_the_world (last accessed in 07.03.2026).
39. Rosenberry, D. O., J. Lewandowski, K. Meinikmann, and G. Nützmann, 2015: Groundwater – the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 1: effects of groundwater on hydrology. *Hydrological Processes,* **29**, 2895–2921, https://doi.org/10.1002/hyp.10403
40. Shiklomanov, I. A., 1989: Climate and water resources. *Hydrological sciences journal,* **34** (5), 495–529, EDN: XOBCMK, https://doi.org/10.1080/02626668909491359
41. Silich, M., 1971: Vodniy balans zaliva (Water balance of lagoon). N. Lazarenko, A. Maevski (eds). *Hydrometeorological regime of Vistula Lagoon,* Leningrad, Hydrometeoizdat, 143–172.

42. Sonntag, D., 1990: Important new values of the physical constants of 1986, vapor pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae. *Z. Meteorol*., **70**, 340–344, https://cir.nii.ac.jp/crid/1571417126635965952
43. Tóth, J., 1971: Groundwater discharge: a common generator of diverse geologic and morphologic phenomena. *Hydrological Sciences Journal,* **16** (1), 7–24, https://doi.org/10.1080/02626667109493029
44. Winter, T. C., J. W. Harvey, O. L. Franke, and W. M. Alley, 1998: *Ground Water and Surface Water: A Single Resource*, Denver, U.S. Geological Survey, 89 p., https://doi.org/10.3133/cir1139
45. Woolway, R. I., B. M. Kraemer, J. D. Lenters, C. J. Merchant, C. M. O'Reilly, and S. Sharma, 2020: Global lake responses to climate change. *Nature reviews earth & environment,* **1** (8), 388–403, EDN: VMRRKX, https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5
46. Zhang, S., C. Chen, H. Tang, G. Jin, B. Zhou, H. Yuan, and H. Chen, 2024: Solute transport characteristics at the lakebed sediment-water interface due to multiple influences of dual seasonal lakes. *Science of the Total Environment,* **918**, 170284, EDN: LTVEOR, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170284

Submitted 20.07.2026, accepted 30.08.2026.
For citation: Domnin, D. A., 2026: Reconstruction of water balance components based on field observations and model estimates for a small closed coastal lake. *Journal of Oceanological Research*, **54** (3), 38–60, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(3).3

基于现场观测与模型评估的近岸海域小型无出流水体水量平衡各分量重建

D. A. Domnin

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编 : *117997, Russia,*
电子邮件 : *dmitriy.domnin@atlantic.ocean.ru*

基于对现场数据 (2023–2024年) 与数值评估的综合分析 , 对东南波罗的海近岸无出流水体——扬塔尔内池塘 (加里宁格勒州) 进行了水量平衡计算。确定了平衡各主要分量的定量特征 : 降水、蒸发、地表径流与地下径流。为计算蒸发量 , 验证了三个经验公式 (Meyer、Rover、Vikulina–Braslavsky) ; 结果表明 , 对该地区条件而言 , Rover方程给出的结果最具物理依据。据其计算 , 年蒸发总量2023年为680毫米 , 2024年为600毫米 (非完整年份) 。利用HYPE模型估算的流域地表径流具有显著的季节不均一性 : 冬季为70毫米/月 , 夏季枯水期为3–7毫米/月。首次采用残差法获得了该水体水量平衡地下分量的定量评估。研究发现地下水交换存在明显的年际变化 : 2023年以池塘地下水流出为主 (–420毫米) , 2024年则记录到流入 (+130毫米) , 这可由渗流过程的滞后性及 "湖泊—地下水" 系统的缓冲容量来解释。相关分析揭示了水位对地下径流变化的滞后响应 , 特征响应时间约为两个月。所得结果可作为加里宁格勒州近岸水体水量平衡区域评估的方法学基础。

关键词 : 水量平衡 , 地下水交换 , 数值模拟 , 东南波罗的海 , 加里宁格勒州 , 扬塔尔内池塘

致谢 : 本研究在俄罗斯联邦科学与高等教育部下达给 Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences 的国家任务 (课题编号 : FMWE-2024-0025) 框架内完成。