ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCE

CENTRAL ASIAN SCIENTIFIC JOURNAL
ISSN 3135-3061
2026. №4 (32), Том 2. С. 616–622
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.24491779
Сайт журнала: https://cajournal.kz

УДК 556.06:556.166

ЗАБЛАГОВРЕМЕННЫЙ ПРОГНОЗ ВЕСЕННЕГО ПРИТОКА В АСТАНИНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ ПО ИНДЕКСУ ПРЕДЗИМНЕГО УВЛАЖНЕНИЯ ВОДОСБОРА

А.Р. Рамазан
Astana IT University, Астана, Казахстан

Рамазан Ахмедияр Рустемұлы — магистрант 2 курса образовательной программы «Applied Data Analytics», Astana IT University, Астана, Казахстан.

Научный руководитель: Ламашева Жанар Бейбутовна — PhD, ассоциированный профессор, Astana IT University, Астана, Казахстан.

© А.Р. Рамазан, 2026

Аннотация: Цель работы — оценить возможность прогноза весеннего притока в Астанинское водохранилище в начале декабря, на 2–3 месяца раньше оперативных прогнозов. Предложен индекс предзимнего увлажнения водосбора (ИПУ), объединяющий осадки осени на метеостанциях и влажность почвы по реанализу NASA POWER; модели проверены с исключением года, «в реальном времени» и при переносе между сухим и влажным периодами, а также сравнены с пятью методами машинного обучения. Модель по ИПУ дала NSE = 0,60 и S/σ = 0,63, превзойдя модель по осенним осадкам, базовые прогнозы и методы машинного обучения, и сохранила удовлетворительное качество «в реальном времени» (S/σ = 0,71). Выявлен сдвиг водного режима после 2012 г., около 83 % которого объясняется более влажными осенями.

Ключевые слова: весенний приток, долгосрочный прогноз, индекс увлажнения, влажность почвы, Астанинское водохранилище, река Есиль, машинное обучение, смена водного режима

Введение

Северный и Центральный Казахстан относятся к зоне недостаточного увлажнения, где большая часть осадков испаряется, а речной сток формируется главным образом талыми водами [1, 2]. Река Есиль — типичная река с весенним половодьем [3]. Астанинское (Вячеславское) водохранилище в её верхнем течении — основной источник водоснабжения столицы: в 2019 г. оно обеспечило около 88 % потребности города [4]. Весенний приток в водохранилище в 2000–2024 гг. менялся от 17 до 499 млн м³, поэтому заблаговременная оценка притока важна для планирования водопользования; высокая изменчивость водности региона отмечается и в работах о засухах и паводках [5, 6, 7].

Долгосрочные прогнозы объёма половодья выпускает РГП «Казгидромет» в феврале–марте с учётом снегозапасов, осеннего увлажнения и промерзания почвы [8]. Для р. Есиль у с. Тургень по снегозапасам получены прогнозы с S/σ = 0,66 на 1 февраля и 0,58 на 1 марта [9]; для рек Восточного Казахстана регрессионные модели дают S/σ = 0,46–0,53 [10, 11]. Почва, ушедшая под снег влажной, после промерзания слабо впитывает талую воду [12, 13], а сильнейшие половодья возникают при совпадении большого снегозапаса и ограниченной инфильтрации [14]. Осеннее увлажнение известно уже в начале декабря, однако осадки двух-

трёх станций плохо представляют водосбор, а сеточные данные имеют собственные ошибки [15].

Цель работы — разработать индекс предзимнего увлажнения водосбора, объединяющий станционные данные и реанализ, и оценить качество прогноза весеннего притока в Астанинское водохранилище по этому индексу в начале декабря, в том числе при смене водного режима.

Материалы и методы

Водосбор водохранилища выше плотины, определённый по базе HydroBASINS [16], занимает около 5,1 тыс. км² (рисунок 1). Использованы суточные расходы воды РГП «Казгидромет» на постах р. Есиль — с. Турген и р. Мойылды — с. Николаевка (1995–2024 гг.), суточные осадки и высота снега на метеостанциях Аршалы и Осакаровка (2000–2024 гг.) [17] и реанализ NASA POWER [18] на основе MERRA-2 [19] — осадки и влажность корнеобитаемого слоя почвы, осреднённые по четырём узлам сетки. Годовые осадки реанализа коррелируют со станционными (r = 0,77–0,80).

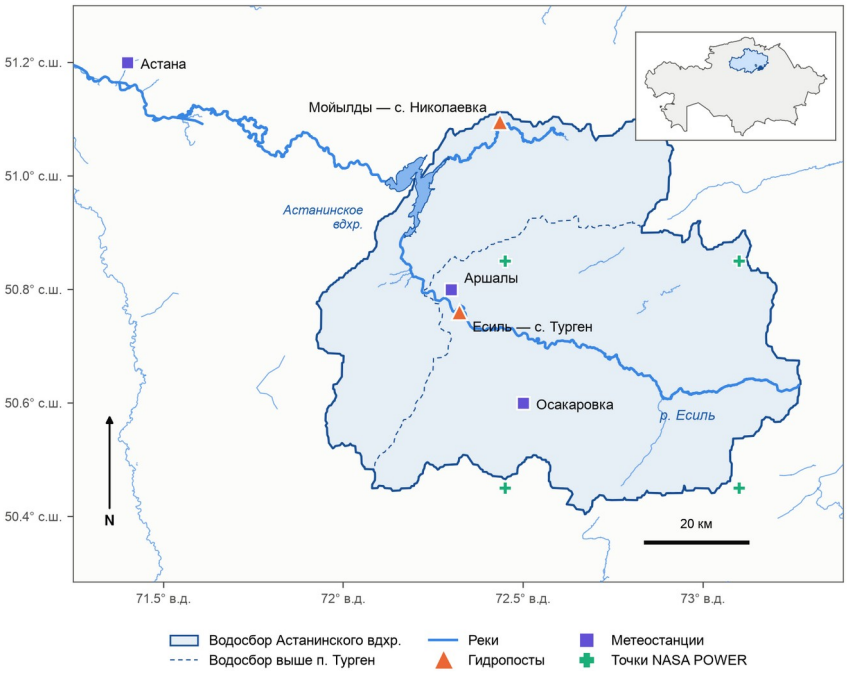

Рисунок 1 - Водосбор Астанинского водохранилища, гидрологические посты, метеостанции и узлы реанализа NASA POWER

Прогнозируемая величина — суммарный приток рек Есиль и Мойылды за март–июнь, млн м³. Пропуски наблюдений в начале весны (ледостав) заполнены первым измеренным расходом, если он был меньше 1 м³/с, т.е. соответствовал зимней межени; годы, в которых половодье началось до наблюдений, исключены; сток р. Мойылды в неполных годах восстановлен по связи с Есилем. Сформирован ряд 2001–2023 гг. (23 года); 2024 г. использован для независимой проверки.

Индекс предзимнего увлажнения водосбора (ИПУ) объединяет осадки сентября–ноября на станциях *P*осень и влажность почвы в октябре–ноябре по NASA POWER *W*:

$$ИПУ = \frac{1}{2}\cdot\frac{P - P_{ср}}{\sigma_P} + \frac{1}{2}\cdot\frac{W - W_{ср}}{\sigma_W} \qquad (1)$$

где *P*ср = 82,5 мм, σ*P* = 20,7 мм, *W*ср = 0,416, σ*W* = 0,018 — средние и стандартные отклонения за 2001–2023 гг. Источники связаны умеренно (r = 0,65), поэтому их объединение компенсирует часть независимых ошибок; веса заданы заранее равными, так как на коротких рядах подобранные коэффициенты неустойчивы [20].

Модель прогноза — линейная регрессия притока на ИПУ. Для сравнения оценены модели по каждому компоненту, базовые прогнозы (норма, «как в прошлом году», тренд) и пять методов машинного обучения [21] с заранее заданными гиперпараметрами. Качество

оценивалось при последовательном исключении года [22], «в реальном времени» (с 2011 г. модель обучается только на предшествующих годах) и при переносе между периодами 2001–2012 и 2013–2023 гг. [23]. Использованы коэффициент детерминации R^2, коэффициент Нэша–Сатклиффа NSE [24], средняя квадратическая (RMSE) и абсолютная (MAE) ошибки, критерий S/σ (удовлетворительно при $S/\sigma \le 0{,}80$) и обеспеченность допустимой ошибки $0{,}674\sigma$ [25, 26]. Однородность ряда проверялась тестом Петтита [27].

Результаты и обсуждение

Средний приток за 2001–2023 гг. составил 183 млн м³ (Cv = 0,62). Линейный тренд незначим (p = 0,11), однако тест Петтита выявляет сдвиг после 2012 г. (p ≈ 0,02): средний приток вырос со 119 до 252 млн м³. Одновременно увлажнились осени, и ИПУ вырос с −0,51 до +0,56 (рисунок 2); по модели этот сдвиг объясняет около 83 % скачка притока.

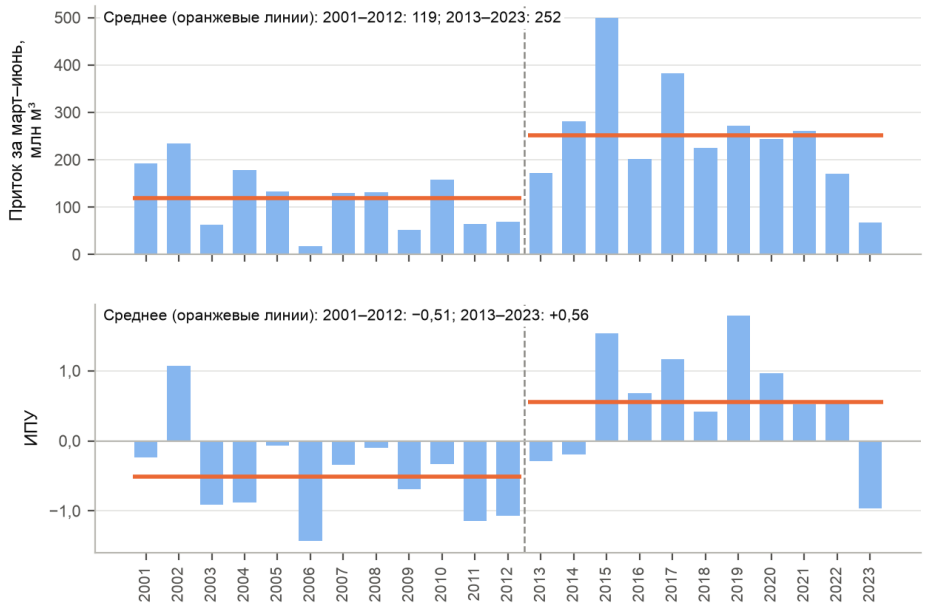

Рисунок 2 - Весенний приток (вверху) и индекс предзимнего увлажнения (внизу); линии — средние за 2001–2012 и 2013–2023 гг.

Связь притока с ИПУ теснее, чем с каждым из его компонентов, и сохраняется после исключения тренда (таблица 1, рисунок 3). Индекс характеризует долю зимней влаги, уходящей в весенний сток: его связь с коэффициентом стока половодья r = 0,79. Уравнение модели:

Таблица 1 – Связь весеннего притока с предикторами, 2001–2023 гг.

Предиктор	**r**	**ρ**	**r без тренда**
Осадки сентября–ноября, станции	0,76	0,70	0,72
Влажность почвы октября–ноября, NASA POWER	0,76	0,82	0,72
Осадки сентября–ноября, NASA POWER	0,68	0,63	0,63
Индекс предзимнего увлажнения (ИПУ)	0,84	0,84	0,81
Приток прошлой весны	0,36*	0,48	0,23*
Осадки ноября–марта, станции**	0,53	0,58	0,45
Максимальная высота снега, станции**	0,27*	0,27	0,07*

Примечание: * — незначимо при p = 0,05; ** — к декабрю неизвестны.

$$V = 182{,}6 + 103{,}8 \cdot ИПУ\,,\; R^2 = 0{,}70 \qquad (2)$$

где V — приток за март–июнь, млн м³.

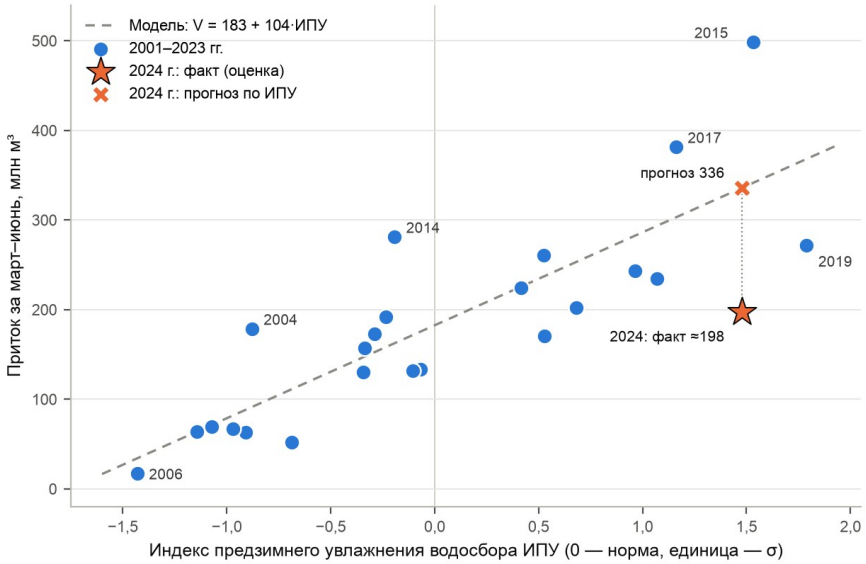

Рисунок 3 - Связь притока за март–июнь с ИПУ, 2001–2023 гг.; оранжевым — 2024 г.

При проверке с исключением года модель по ИПУ дала NSE = 0,60, S/σ = 0,63, RMSE = 69 млн м³ против 0,45, 0,74 и 81 млн м³ у модели по осенним осадкам (таблица 2). Базовые прогнозы не превзошли норму, а регрессия с подобранными весами компонентов уступила индексу.

Таблица 2 – Качество моделей: R^2 на обучающих данных и метрики при проверке с исключением года

Модель	**R^2**	**NSE**	**RMSE**	**MAE**	**S/σ**	**≤ 0,674σ, %**
Климатическая норма	—	−0,09	115	88	1,05	52
Как в прошлом году	—	−0,30	126	105	1,14	30
Линейный тренд	0,12	−0,05	113	84	1,03	48
Осенние осадки, станции	0,57	0,45	81	60	0,74	74
Влажность почвы, NASA POWER	0,58	0,44	83	56	0,75	83
Осадки + влажность, коэффициенты подобраны	0,70	0,48	80	57	0,72	78
ИПУ (станции + NASA POWER)	0,70	0,60	69	51	0,63	78
ИПУ только по NASA POWER	0,64	0,52	76	56	0,69	74
Осенние осадки + высота снега*	0,62	0,47	80	59	0,73	70

Методы машинного обучения уступили модели по ИПУ (таблица 3); при четырёх предикторах их качество, как правило, снижалось. Разрыв между R^2 на обучающих данных и NSE при проверке указывает на переобучение: у градиентного бустинга R^2 = 0,99 при NSE = 0,43.

Таблица 3 – Сравнение с методами машинного обучения (два предиктора — компоненты ИПУ)

Метод	**R^2**	**NSE**	**RMSE**	**MAE**	**S/σ**	**≤ 0,674σ, %**
Дерево решений (глубина 2)	0,74	0,34	89	67	0,81	63
Случайный лес (500 деревьев)	0,74	0,51	77	59	0,70	68
Градиентный бустинг	0,99	0,43	83	60	0,76	71
Ридж-регрессия	0,67	0,51	77	58	0,70	74
k ближайших соседей (k = 5)	0,63	0,42	84	58	0,76	78
Для сравнения: регрессия по ИПУ	0,70	0,60	69	51	0,63	78

Схемы проверки, учитывающие порядок лет и смену режима, строже (таблица 4, рисунок 4). «В реальном времени» модель по ИПУ осталась удовлетворительной, а модель по осенним осадкам — нет; при переносе между сухим и влажным периодами только модели на основе индекса сохранили NSE > 0, хотя смещение (−18 % и +22 %) указывает на более сильный отклик стока во влажные годы.

Таблица 4 – Качество прогнозов «в реальном времени» и при переносе между периодами (NSE / S/σ)

Схема проверки	Осенние осадки	ИПУ
«Реальное время», 2011–2023 гг.	0,26 / 0,86	0,50 / 0,71
«Реальное время», 2011–2024 гг.	0,07 / 0,96	0,40 / 0,77
Обучение 2001–2012 → проверка 2013–2023	−0,09 / 1,04	0,32 / 0,82
Обучение 2013–2023 → проверка 2001–2012	−0,22 / 1,11	0,44 / 0,75

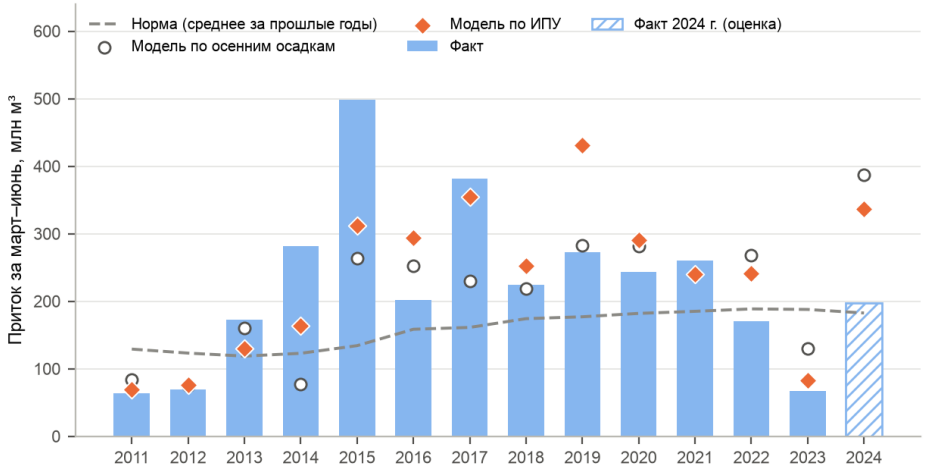

Рисунок 4 - Фактический приток и прогнозы «в реальном времени»; 2024 г. — оценка факта

В 2024 г. при рекордно влажной осени (132,2 мм) и малом снегозапасе модель по ИПУ завысила приток (336 млн м³ при факте около 198 млн м³; +70 %), хотя и меньше, чем модель по осадкам (+96 %). Ошибки 2014 и 2024 гг. согласуются с совместным влиянием осеннего увлажнения и снегозапасов [14]: индекс показывает, какая доля воды стечёт, но не сколько её накопится. По точности декабрьский прогноз сопоставим с прогнозом на 1 февраля по снегозапасам [9] и может служить первой ступенью поэтапного прогноза. По данным осени 2024 г. модель прогнозирует приток весной 2025 г. 336 млн м³ (90 %-й интервал 210–461). Ограничения работы — короткий ряд (23 года), опробование нескольких вариантов предикторов и использование реанализа вместо измерений влажности почвы.

Заключение

Предложен индекс предзимнего увлажнения водосбора, объединяющий осадки осени на станциях и влажность почвы по реанализу NASA POWER. Модель по индексу позволяет прогнозировать весенний приток в Астанинское водохранилище в начале декабря с удовлетворительным качеством (NSE = 0,60, S/σ = 0,63) и, в отличие от модели по осадкам и методов машинного обучения, сохраняет эффективность при смене водного режима после 2012 г. Декабрьский прогноз целесообразно уточнять весной по данным снегомерных съёмок; дальнейшие шаги — проверка на 2025–2026 гг. и учёт нелинейной связи увлажнения и снегозапасов.

Список литературы:

1. Ортбаева А.У. Изменение основных характеристик гидрологического режима р. Есиль под влиянием хозяйственной деятельности // Гидрометеорология и экология. – 2007. – № 2. – С. 73–79.

2. Ongdas N., Yapiyev V., Stefan C., Mehan S., Muzdybaev M., Hartmann A. Lowland transboundary river in a cold, semi-arid steppe: review of the Yesil River basin // Environmental Earth Sciences. – 2025. – Vol. 84, No. 17. – Art. 496. – DOI: 10.1007/s12665-025-12500-0.

3. Медеу Н.Н., Елтай А.Ғ. Исследование наводнений и затоплений на реке Есиль у города Петропавловск // Гидрометеорология и экология. – 2024. – № 2 (113). – С. 16–24. – DOI: 10.54668/2789-6323-2024-113-2-16-24.

4. Nassir A., Xenarios S., Laljebaev M., Tortajada C., Li P. Environmental-economic accounting for sustainable water planning: A case study of water supply systems in Kazakhstan // HydroResearch. – 2026. – DOI: 10.1016/j.hydres.2026.09.003.

5. Алагуджаева М.А., Садвакасова С.Р., Елбасиева Б.Б., Аимбетов А.А. Условия формирования наводнений на территории Центрального Казахстана // Гидрометеорология и экология. – 2023. – № 4 (111). – С. 61–73. – DOI: 10.54668/2789-6323-2023-111-4-61-73.

6. Dautaliyeva M., Makhmudova L., Talipova E., Birimbayeva L. et al. Spatial Coherence and Non-Stationary Drought Dynamics in Water Management Basins of Northern and Central Kazakhstan // Environments. – 2026. – Vol. 13, No. 10. – Art. 520. – DOI: 10.3390/environments13100520.

7. Kakabayev A., Yessenzholov B., Khussainov A. et al. The Impact of Climate Change on the Water Systems of the Yesil River Basin in Northern Kazakhstan // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 22. – Art. 15745. – DOI: 10.3390/su152215745.

8. РГП «Казгидромет». Основной прогноз по паводкам на 2024 год [Электронный ресурс]. – URL: https://kazhydromet.kz/en/post/2551 (дата обращения: 24.11.2026).

9. Абаев Н.Н., Биримбаева Л.М., Тілләкәрім Т.А., Серікбай Н.Т. Прогнозирование объема стока половодья реки Есиль методом распознавания образов // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 3 (102). – С. 27–35. – DOI: 10.54668/2789-6323-2021-102-3-27-35.

10. Саиров С.Б., Тілләкәрім Т.А., Серікбай Н.Т. Некоторые моменты совершенствования прогнозирования объема половодья в условиях ограниченных гидрометеорологических данных // Гидрометеорология и экология. – 2024. – № 3 (114). – С. 7–19. – DOI: 10.54668/2789-6323-2024-114-3-7-19.

11. Sairov S.B., Serikbay N.T., Rodrigo-Ilarri J., Alimkulov S.K., Tillakarim T.A., Rodrigo-Clavero M.E. Improved forecasting of spring flood volume and low-flow discharge in the Buktyrma river (Kazakhstan) using hydrometeorological and soil–water indicators // Applied Water Science. – 2026. – Vol. 16, No. 8. – Art. 242. – DOI: 10.1007/s13201-026-02930-x.

12. Gray D.M., Toth B., Zhao L., Pomeroy J.W., Granger R.J. Estimating areal snowmelt infiltration into frozen soils // Hydrological Processes. – 2001. – Vol. 15, No. 16. – P. 3095–3111. – DOI: 10.1002/hyp.320.

13. Kuchment L., Gelfan A. Long-term probabilistic forecasting of snowmelt flood characteristics and the forecast uncertainty // Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management. – IAHS Publ. 313. – 2007. – P. 213–220.

14. Nurakynov S., Iskaliyeva G., Merekeyev A., Dedova T., Dabas J., Sydyk N., Kalybayeva A. Compound Spring Flood Hazards in Kazakhstan and Comparable Cold-Continental Regions: Mechanisms, Indicators, and Recovery Assessment // Water. – 2026. – Vol. 18, No. 14. – Art. 1717. – DOI: 10.3390/w18141717.

15. Song L., Xu C., Long Y., Lei X., Suo N., Cao L. Performance of Seven Gridded Precipitation Products over Arid Central Asia and Subregions // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, No. 23. – Art. 6039. – DOI: 10.3390/rs14236039.

16. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // Hydrological Processes. – 2013. – Vol. 27, No. 15. – P. 2171–2186. – DOI: 10.1002/hyp.9740.

17. РГП «Казгидромет». Гидрологическая и метеорологическая базы данных [Электронный ресурс]. – URL: https://meteo.kazhydromet.kz/database_hydro (дата обращения: 24.11.2026).

18. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Project [Электронный ресурс]. – URL: https://power.larc.nasa.gov/ (дата обращения: 24.11.2026).

19. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // Journal of Climate. – 2017. – Vol. 30, No. 14. – P. 5419–5454. – DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

20. Dawes R.M. The robust beauty of improper linear models in decision making // American Psychologist. – 1979. – Vol. 34, No. 7. – P. 571–582. – DOI: 10.1037/0003-066X.34.7.571.

21. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al. Scikit-learn: Machine learning in Python // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – P. 2825–2830.

22. Arlot S., Celisse A. A survey of cross-validation procedures for model selection // Statistics Surveys. – 2010. – Vol. 4. – P. 40–79. – DOI: 10.1214/09-SS054.

23. Klemeš V. Operational testing of hydrological simulation models // Hydrological Sciences Journal. – 1986. – Vol. 31, No. 1. – P. 13–24. – DOI: 10.1080/02626668609491024.

24. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10, No. 3. – P. 282–290. – DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

25. Давлетгалиев С.К. Статистические методы обработки гидрологической информации: учебник. – Алматы: Қазақ университеті, 2015. – 276 с.

26. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 355 с.

27. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // Applied Statistics. – 1979. – Vol. 28, No. 2. – P. 126–135. – DOI: 10.2307/2346729.