
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 556.16.06

МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ РЕЧНОГО СТОКА ПО ИСТОЧНИКАМ ПИТАНИЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ

Наумова Анна Анатольевна¹

¹ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; Россия, Москва
koshevaya81@mail.ru
соискатель кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами

Аннотация. Речной сток формируется за счёт совокупности источников питания: дождевых осадков, талых снеговых и ледниковых вод, а также подземных вод. Количественное разделение суммарного стока на составляющие имеет как теоретическое, так и практическое значение для управления водными ресурсами и оценки реакции речных систем на климатические изменения. В статье представлен систематический обзор основных методов разделения речного стока по источникам питания. Рассмотрены четыре класса методов: графические методы анализа гидрографа, цифровые рекурсивные фильтры, гидрохимические методы и изотопные методы. Для каждого подхода охарактеризованы физические основания, требования к исходным данным, достоинства и ограничения. Показано, что ни один из методов не является универсальным: выбор определяется доступностью данных, временным масштабом задачи и типом водосбора. Наиболее операциональными для длинных рядов наблюдений остаются цифровые фильтры Лайна–Холлика и Экхардта. Для понимания механизмов формирования паводочного стока незаменимы изотопные методы на основе $\delta^{18}\text{O}$ и δD . В условиях ограниченных данных сохраняют ценность отечественные методы межennale анализа. Перспективным направлением является комплексирование изотопных трассеров с гидрохимическими данными в рамках многокомпонентного байесовского анализа с количественной оценкой неопределённости результатов.

Ключевые слова: источники питания рек, разделение гидрографа, базисный сток, цифровые фильтры, изотопные трассеры, гидрохимический метод, подземное питание, индекс базисного стока, межennale сток, водный баланс.

Для цитирования: Наумова Ана Анатольевна МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ РЕЧНОГО СТОКА ПО ИСТОЧНИКАМ ПИТАНИЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ/ Наумова Ана Анатольевна // Агрофорсайт. 2026. № 3— Саратов: ООО «ЦеСАин», 2026. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.

METHODS OF RIVER RUNOFF SEPARATION BY SOURCES OF SUPPLY: CURRENT STATE AND COMPARATIVE ANALYSIS OF

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural
Academy Naumova Anna Anatolyevna¹

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; Russia, Moscow
E-mail: koshevaya81@mail.ru

Doctoral candidate, Department of Hydraulics, Hydrology and Water Resources Management

Abstract. River runoff is formed through a combination of water sources, including rainfall, snowmelt, glacial melt, and groundwater. The quantitative separation of total streamflow into individual components is of both theoretical and practical importance for water resources management and for assessing the response of river systems to climate change. This article presents a systematic review of

the principal methods used for separating river runoff by source of supply. Four classes of methods are examined: graphical hydrograph separation techniques, recursive digital baseflow filters, hydrochemical methods, and isotopic methods. For each approach, the physical basis, data requirements, advantages, and limitations are characterised. It is demonstrated that no single method is universally applicable; the choice of method depends on data availability, the temporal scale of the task, and the type of catchment. Digital filters, specifically the Lyne–Hollick and Eckhardt filters, remain the most operationally convenient tools for long-term discharge records. Isotopic methods based on $\delta^{18}\text{O}$ and δD are indispensable for understanding the mechanisms of flood runoff generation. Under conditions of limited data, traditional Russian low-flow analysis methods retain their practical value. The most promising direction for future development is the integration of isotopic tracers with hydrochemical data within multi-component Bayesian frameworks that allow for quantitative uncertainty estimation.

Keywords: river water sources, hydrograph separation, baseflow, digital filters, isotopic tracers, hydrochemical method, groundwater recharge, base flow index, low flow, water balance.

Введение. Речной сток является интегральным результатом взаимодействия атмосферных осадков, почвенного покрова, рельефа и геологического строения водосбора. Он формируется за счёт нескольких источников питания — дождевого, снегового, ледникового и подземного, — соотношение которых определяет гидрологический режим водотока, его реакцию на климатические воздействия, качество воды и экологическое состояние речной системы в целом. В условиях наблюдаемого потепления климата и изменения режима осадков соотношение источников питания претерпевает значимые трансформации, что обуславливает особую актуальность задачи их количественной оценки.

В отечественной гидрологической школе систематизация источников питания рек была проведена Б.Д. Зайковым [1], выделившим четыре основных типа и смешанный тип, характерный для большинства рек умеренных широт. Методическому обеспечению расчётов составляющих стока посвящены фундаментальные работы Д.Л. Соколовского [2] и Б.И. Куделина [6]. Зарубежные подходы к разделению стока активно развивались начиная с 1970-х годов, концентрируясь преимущественно на применении изотопных трассеров [7, 9] и автоматизированных цифровых фильтров [3, 8]. Несмотря на значительный прогресс в данной области, единый методический стандарт до сих пор не выработан, а выбор конкретного метода в практике исследований по-прежнему остаётся предметом дискуссий.

Целью настоящей работы является систематизация и сравнительный анализ основных методов разделения речного стока по источникам питания с оценкой применимости каждого подхода в различных природных условиях. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: охарактеризовать физические основания каждого класса методов; оценить требования к исходным данным и ограничения их применения; провести сравнительный анализ по ключевым критериям; определить направления перспективного развития методического аппарата.

Материалы и методы исследования. Работа выполнена на основе анализа отечественной и зарубежной научной литературы, включающей классические труды по гидрологии [1, 2, 6] и современные методические разработки [3, 4, 5, 7, 8, 9, 10]. Объектом исследования являются методы разделения речного стока, предметом — физические основания, достоинства и ограничения каждого метода, а также критерии их выбора в зависимости от условий применения. В качестве основного метода исследования использован сравнительно-аналитический подход: систематизация существующих методов, выявление их общих черт и различий, а также оценка области применимости на основе обобщения опубликованных данных.

Среди рассматриваемых подходов исторически первым являются графические методы — визуальное разделение гидрографа на быстрый паводочный и медленный базисный сток [2]. Их развитием стали цифровые рекурсивные фильтры, предложенные Лайном и Холликом [8] и усовершенствованные Экхардтом [3], что позволило связать параметры алгоритма с физическими свойствами водосбора. Принципиально иную основу имеют гидрохимические методы, опирающиеся на баланс природных химических трассеров: метод двухкомпонентного разделения был формализован Пиндером и Джонсом [10], трёхкомпонентные схемы развиты в работе Хупера и соавторов [4]. Наивысшей физической обоснованностью обладают изотопные методы, использующие стабильные изотопы кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD), тритий (^3H) и радон (^{222}Rn); их теоретическая основа заложена в работе Крейга [9] и получила практическое применение в исследованиях Склаша и Фарволдена [7]. Выбор конкретного метода в зависимости от доступности данных и масштаба задачи представлен на рис. 1.

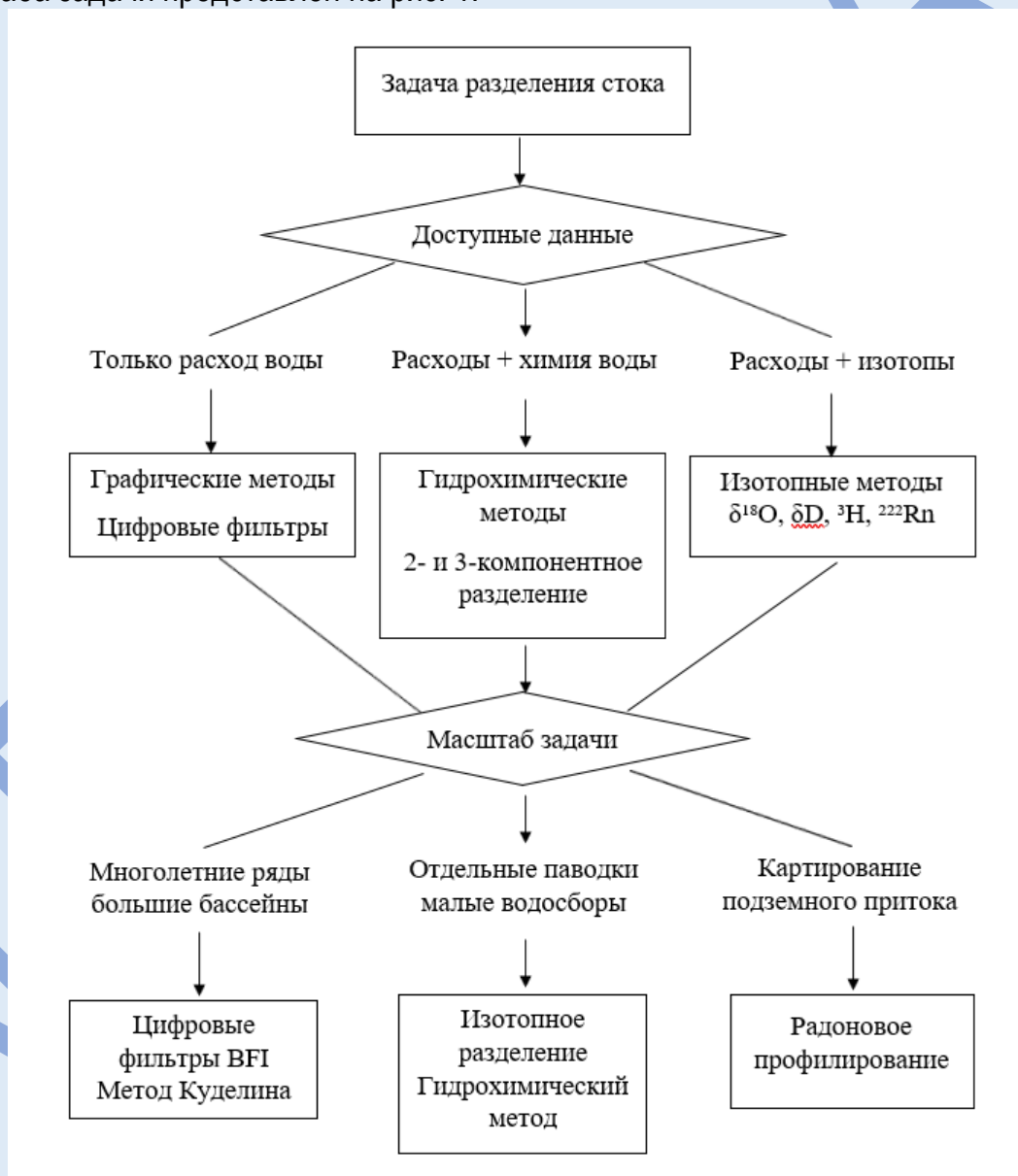


Рисунок 1. Алгоритм выбора метода разделения речного стока по источникам питания в зависимости от доступных данных и пространственно-временного масштаба задачи

Результаты исследования

1. Цифровые фильтры для выделения базисного стока.

Цифровые рекурсивные фильтры позволяют автоматизировать процедуру разделения гидрографа и применять её к длинным рядам наблюдений, что делает их особенно удобными для регионального анализа. Фильтр Лайна–Холлика [8] реализует однопараметрическую рекурсивную схему, в которой быстрая составляющая стока q_f (нижний индекс f от англ. fast — быстрый) на текущем временном шаге вычисляется по формуле (1):

$$q_f(i) = \alpha \cdot q_f(i-1) + \frac{1+\alpha}{2} \cdot [Q(i) - Q(i-1)] \quad (1)$$

где $q_f(i)$ и $q_f(i-1)$ — быстрая составляющая стока на текущем и предыдущем шагах; $Q(i)$ и $Q(i-1)$ — суммарный расход воды на соответствующих шагах; α — параметр фильтра, принимающий типичные значения в диапазоне 0,925–0,980. Базисный сток определяется как разность $b(i) = Q(i) - q_f(i)$, при условии $0 \leq b(i) \leq Q(i)$, а процедура выполняется многократным прохождением фильтра в прямом и обратном направлениях по временному ряду.

Более совершенным является двухпараметрический фильтр Экхардта [3], который учитывает физические свойства водосбора через параметр максимального индекса базисного стока BFI_{max} . Базисный сток в данном случае вычисляется по формуле (2):

$$b(i) = \frac{(1-BFI_{max}) \cdot a \cdot b(i-1) + (1-a) \cdot BFI_{max} \cdot Q(i)}{1-a \cdot BFI_{max}} \quad (2)$$

где $b(i)$ и $b(i-1)$ — базисный сток на текущем и предыдущем временных шагах; BFI_{max} — максимальный индекс базисного стока, являющийся постоянным параметром конкретного водосбора; a — константа рецессии; $Q(i)$ — суммарный расход на текущем шаге. Согласно рекомендациям автора [3], для постоянных водотоков на пористых породах следует принимать $BFI_{max} = 0,80$, для постоянных водотоков на скальных и трещиноватых породах — 0,25, для эфемерных водотоков — 0,50.

Индекс базисного стока BFI , представляющий собой отношение объёма базисного стока к суммарному годовому стоку, варьирует от 0,15–0,25 для водотоков на слабопроницаемых породах до 0,90–0,95 для рек, дренирующих карстовые и трещиноватые водоносные горизонты.

2. Гидрохимические методы разделения стока

Принципиально иной подход основан на использовании химического состава воды в качестве естественного трассера. Его физическим основанием служит различие в минерализации воды из разных источников питания: атмосферные осадки характеризуются крайне низкой минерализацией, тогда как подземные воды несут

продукты химического выветривания горных пород. Метод двухкомпонентного разделения [10] базируется на уравнении баланса химического трассера (3):

$$C_r \cdot Q_r = C_e \cdot Q_e + C_p \cdot Q_p \quad (3)$$

где C — концентрация трассера; Q — расход воды; нижние индексы обозначают: r — реку (river), e — подземные воды (groundwater), p — прямой паводочный сток (event water).

В качестве химических трассеров наиболее часто применяются электропроводность воды, концентрации кремниевой кислоты, хлоридов и щелочность.

Ограничением двухкомпонентного метода является допущение о пространственной и временной однородности химического состава каждой составляющей. Для преодоления этого ограничения разработаны трёхкомпонентные схемы [4], одновременно использующие два независимых трассера, что позволяет выделить три составляющие: старые подземные воды, воду почвенного горизонта и прямой поверхностный сток.

3. Изотопные методы

Наибольшей физической обоснованностью среди рассматриваемых подходов обладают изотопные методы. Их теоретической основой служит глобальная линия метеорных вод, установленная Крейгом [9] и описывающая соотношение стабильных изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках по всему миру (4):

$$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \text{ ‰} \quad (4)$$

где δD и $\delta^{18}O$ — значения изотопного состава водорода и кислорода, выраженные в промилле (‰) относительно стандарта SMOW.

Зависимость (4) является универсальным инструментом идентификации происхождения водных масс: отклонение от глобальной линии метеорных вод свидетельствует о вторичных процессах — испарении, смешении или взаимодействии воды с горными породами.

Метод двухкомпонентного изотопного разделения гидрографа, формализованный Склашем и Фарволденом [7], позволил обнаружить так называемый изотопный парадокс: в период дождевых паводков большую часть стока — нередко 50–80% — составляет «старая» вода, присутствовавшая в водосборе ещё до начала дождя. Этот результат принципиально пересмотрел господствовавшую концепцию о преимущественно поверхностном генезисе быстрой составляющей паводочного стока и стимулировал широкое развитие изотопных исследований на малых экспериментальных водосборах.

Самостоятельным изотопным инструментом служит радон (^{222}Rn) — радиоактивный благородный газ, образующийся при распаде радия в горных породах и накапливающийся в подземных водах в концентрациях, на несколько порядков превышающих его содержание в поверхностных водах. Это свойство позволяет применять продольное профилирование концентрации ^{222}Rn вдоль речного русла для картирования зон разгрузки подземных вод с высоким пространственным разрешением: локальные максимумы концентрации радона однозначно указывают на участки активного грунтового притока. Метод особенно

эффективен при низких расходах воды в период межени, когда подземная составляющая стока является преобладающей, и широко применяется для количественной оценки инфильтрационного питания рек [5].

4. Метод меженного анализа и отечественная традиция

В отечественной гидрогеологии оценка подземной составляющей речного стока традиционно проводилась по методу Б.И. Куделина [6], основанному на анализе меженного стока — минимального расхода воды в периоды отсутствия поверхностного и внутрпочвенного питания. Дополнительным инструментом служит метод гидрологических аналогов, позволяющий оценивать подземное питание по данным водотоков-аналогов в пределах единого гидрогеологического района. Этот подход широко применялся при составлении карт подземного стока СССР и сохраняет практическую ценность для малоизученных территорий, где химический и изотопный мониторинг не ведётся.

5. Сравнительный анализ методов

Систематизация рассмотренных подходов по ключевым критериям представлена в таблице 1.

Таблица 1.– Сравнительная характеристика методов разделения речного стока по источникам питания

Требования к данным	Минимальные	Ряды расходов	Хим. анализ	Изотоп. анализ
Стоимость реализации	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая
Объективность	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая
Физическая обоснованность	Слабая	Слабая	Средняя	Сильная
Применимость к длинным рядам	Ограничена	Высокая	Ограничена	Ограничена
Пространственное разрешение	Точечное	Точечное	Точечное	Бассейновое (интегральное)
Типичные значения BFI	—	0,15–0,95	—	—

Как следует из данных табл. 1, графические и фильтрационные методы обеспечивают лишь условное разделение стока без однозначного физического соответствия конкретным путям движения воды в водосборе. Изотопные методы позволяют напрямую идентифицировать водные массы различного происхождения, однако их применение сопряжено со значительными аналитическими затратами. Гидрохимические методы занимают промежуточное положение: они физически более обоснованы по сравнению с фильтрами, но менее требовательны к оборудованию, чем изотопные подходы. Алгоритм выбора оптимального метода с учётом доступных данных и масштаба задачи систематизирован на рис. 1.

Выводы. Проведённый анализ методов разделения речного стока по источникам питания позволяет сформулировать следующие выводы.

Универсального метода разделения стока, пригодного для любых условий, не существует — выбор подхода определяется совокупностью факторов: доступностью данных, пространственно-временным масштабом задачи и типом водосбора, что наглядно отражено на рис. 1 и в табл. 1.

Цифровые фильтры [3, 8], описываемые формулами (1) и (2), являются наиболее операциональными инструментами для анализа длинных рядов гидрометрических наблюдений и рекомендуются для регионального картирования базисного стока при ограниченном объёме дополнительных данных.

Изотопные методы [7, 9], опирающиеся на зависимость (4), незаменимы для понимания механизмов формирования паводочного стока. Открытый ими изотопный парадокс принципиально изменил представления о генезисе быстрой составляющей стока и по сей день остаётся одним из наиболее значимых результатов экспериментальной гидрологии.

Гидрохимические методы [4, 10], реализованные через уравнение баланса трассера (3), занимают промежуточное положение и особенно эффективны при совместном использовании нескольких трассеров в трёхкомпонентных схемах разделения.

Отечественные методы меженного анализа [6] сохраняют самостоятельную практическую ценность для малоизученных территорий при дефиците данных химического и изотопного мониторинга.

Наиболее перспективным направлением дальнейшего развития является создание мультитрассерных аналитических схем, объединяющих гидрометрические, гидрохимические и изотопные данные в рамках байесовских моделей с количественной оценкой неопределённости результатов разделения.

Список литературы

1. Зайков Б. Д. Очерки гидрологических исследований в России / Б. Д. Зайков. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – 326 с.
2. Соколовский Д. Л. Речной сток / Д. Л. Соколовский. – Л. : Гидрометеиздат, 1968. – 539 с.
3. Eckhardt K. How to construct recursive digital bandpass filters for baseflow separation / K. Eckhardt // *Hydrological Processes*. – 2005. – Vol. 19. – P. 507–515.
4. Hooper R. P. Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members: An application to the Panola Mountain catchment, Georgia, U.S.A. / R. P. Hooper, N. Christophersen, N. E. Peters // *Journal of Hydrology*. – 1990. – Vol. 116, no. 1–4. – P. 321–343.
5. Cook P. G. Estimating groundwater discharge to rivers from river chemistry surveys / P. G. Cook // *Hydrological Processes*. – 2013. – Vol. 27. – P. 3694–3707.
6. Куделин Б. И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод / Б. И. Куделин. – М. : Изд-во МГУ, 1960. – 344 с.
7. Sklash M. G. The role of groundwater in storm runoff / M. G. Sklash, R. N. Farvolden // *Journal of Hydrology*. – 1979. – Vol. 43. – P. 45–65.
8. Lyne V. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling / V. Lyne, M. Hollick // *Hydrology and Water Resources Symposium : труды конф.* – Perth : Institution of Engineers Australia, 1979. – P. 89–93.
9. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters / H. Craig // *Science*. – 1961. – Vol. 133, no. 3465. – P. 1702–1703.
10. Pinder G. F. Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff / G. F. Pinder, J. F. Jones // *Water Resources Research*. – 1969. – Vol. 5, no. 2. – P. 438–445.

References

1. Zaykov B. D. *Ocherki gidrologicheskikh issledovaniy v Rossii* [Essays on hydrological research in Russia], Leningrad, Gidrometeizdat, 1973. 326 p.
2. Sokolovskiy D. L. *Rechnoy stok* [River runoff], Leningrad, Gidrometeizdat, 1968. 539 p.
3. Eckhardt K. How to construct recursive digital bandpass filters for baseflow separation, *Hydrological Processes*, 2005, vol. 19, pp. 507–515. DOI 10.1002/hyp.5675.
4. Hooper R. P., Christophersen N., Peters N. E. Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members: An application to the Panola Mountain catchment, Georgia, U.S.A., *Journal of Hydrology*, 1990, vol. 116, no. 1–4, pp. 321–343. DOI 10.1016/0022-1694(90)90131-G.
5. Cook P. G. Estimating groundwater discharge to rivers from river chemistry surveys, *Hydrological Processes*, 2013, vol. 27, pp. 3694–3707. DOI 10.1002/hyp.9493.
6. Kudelin B. I. *Printsipy regional'noy otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles of regional assessment of natural groundwater resources], Moscow, Izd-vo MGU, 1960. 344 p.
7. Sklash M. G., Farvolden R. N. The role of groundwater in storm runoff, *Journal of Hydrology*, 1979, vol. 43, pp. 45–65. DOI 10.1016/0022-1694(79)90164-1.
8. Lyne V., Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling, *Hydrology and Water Resources Symposium: Proceedings*, Perth, Institution of Engineers Australia, 1979, pp. 89–93.
9. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, 1961, vol. 133, no. 3465, pp. 1702–1703. DOI 10.1126/science.133.3465.1702.
10. Pinder G. F., Jones J. F. Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff, *Water Resources Research*, 1969, vol. 5, no. 2, pp. 438–445. DOI 10.1029/WR005i002p00438.