

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.49

DOI: 10.15372/GIPR20220216

В.В. ШЕПЕЛЁВ

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, sheply@mpi.ysn.ru

МЕЖФАЗОВЫЕ ПЕРЕНОСЫ ВОДЫ КАК ОСНОВА ПРИРОДНЫХ ВОДООБМЕННЫХ ЦИКЛОВ

Обосновывается необходимость поиска новых идей и подходов в исследовании циклической природы планетарного и регионального водообмена. На основе систематизации имеющихся данных и результатов собственных исследований автора анализируется роль межфазовых переносов природных вод в формировании водообменных циклов. Утверждается, что природным водам присущ эффект смешения фаз. Данный эффект обуславливает единство природных вод и высокую интенсивность их межфазового переноса. С использованием подобного методологического подхода конкретизирована схема климатического (гидрологического) круговорота природных вод. Помимо известного атмосферного (атмогенного) цикла, дополнительно выделены криогидрогенный, атмолитогенный, гляциогенный и криолитогенный, рассчитаны масса воды, ежегодно участвующая в этих циклах, интенсивность водообмена в каждом из них и мощность выделяемой или затрачиваемой при этом энергии. Принятие данной схемы позволит более целенаправленно проводить изучение водных ресурсов и различных циклов водообмена.

Ключевые слова: фазовые переходы воды, межфазовые формы движения, циклы водообмена, климатический круговорот воды, интенсивность водообмена.

V.V. SHEPELEV

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
677010, Yakutsk, ul. Merzlotnaya, 36, Russia, sheply@mpi.ysn.ru

INTERPHASE WATER TRANSFERS AS THE BASIS FOR NATURAL WATER-EXCHANGE PROCESSES

The need to seek new ideas and approaches in studying the cyclic nature of planetary and regional water exchange is substantiated. Based on systematizing available data and results obtained by this author, an analysis is made of the role of interphase transfers of natural waters in the formation of water exchange cycles. It is stated that the effect of phase mixing is inherent in natural waters. This effect is responsible for the unity of natural waters, and for a high intensity of their interphase transfer. Such a methodological approach was used to specify the scheme of climatic (hydrological) cycle of natural waters. In addition to the known atmospheric (atmogenic) cycle, cryohydrogenic, atmolithogenic, glaciogenic and cryolithogenic cycles have been identified as well as estimating the mass of water annually involved in these cycles, the intensity of water exchange in each cycle and the output of energy liberated or spent. Implementation of this scheme would provide an opportunity to more purposefully study water resources and various water exchange cycles.

Keywords: water phase transitions, interphase forms of movement, water exchange cycles, climatic water cycle, water exchange intensity.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что вода имеет огромное значение в развитии биологических, ландшафтных, геологических, гидрологических, гляциологических, геофизиологических и многих других не только природных, но и социальных и технологических процессов.

Несмотря на понимание той большой роли, которую вода играет в судьбе нашей планеты и человечества, многие исследователи отмечают, что имеющиеся знания об этом веществе недостаточно глубоки [1–7]. Особенно это касается изучения динамики водообменных циклов, круговорота природных вод и их единства. Так, С.Л. Шварцев, анализируя в своих работах существующие схемы круговорота природных вод, подчеркивает их односторонность и недостаточный учет многих движущих сил водообмена [1, 6].

Все это указывает на необходимость поиска новых идей и подходов в исследовании циклической природы планетарного и регионального водообмена.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Большое значение в раскрытии сущности природных водообменных циклов имеет учет межфазовой формы движения воды. Известно, что важнейшей особенностью того или иного агрегатного состояния вещества является взаимодействие с другими его фазами. При взаимодействии фаз происходит передача вещества из одной фазы в другую, т. е. его перенос, например, из жидкой фазы в газообразную (испарение), из газообразной в жидкую (конденсация) и т. д. Следовательно, фазовые переходы первого рода сопровождаются не только изменением молекулярно-агрегатного состояния вещества, но и его межфазовым переносом, что лежит в основе развития многих главнейших природных процессов.

На важность учета межфазовой формы движения воды при изучении процессов водообмена указывали многие исследователи. Большое значение этой форме движения воды придавал, например, В.И. Вернадский. Он особо подчеркивал, что «переходы воды из одного состояния в другое — генетическое взаимодействие между этими минеральными видами воды, непрерывно идущие и непрерывно обратимые, являются основной чертой природных вод. Отвечающие им процессы характеризуют историю Земли как планеты» [8, с. 23]. На международном симпозиуме по мировому водному балансу, состоявшемся в 1970 г. в Рединге (Англия), в некоторых пленарных докладах подчеркивалось, что в гидрологии существуют насущные теоретические проблемы, ждущие своего разрешения, и прежде всего это касается изучения круговорота природных вод и роли их фазовых превращений в формировании различных циклов влагообмена [9].

Несмотря на понимание особой важности межфазового взаимодействия воды в развитии процессов водообмена, изученность этой формы ее движения нельзя признать удовлетворительной. Более того, в науках о Земле нет единства в названии отдельных фазовых переходов воды. Так, в физике и химической кинетике переход воды, да и любого другого вещества, из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое, называется сублимацией, или возгонкой, а обратный процесс — десублимацией. Однако в метеорологии и гляциологии под сублимацией понимается процесс перехода воды из газообразного состояния в твердую фазу, т. е. этот термин трактуется в противоположном смысле. В некоторых науках, в частности в геокриологии, термин «сублимация» используется одними исследователями в первом значении, а другими — во втором, что вносит еще большую путаницу.

Сложность в изучении межфазовых взаимодействий воды связана с тем, что все три ее основных агрегатных состояния (лед, жидкость, пар) являются не фазово-гомогенными, а фазово-гетерогенными. Иными словами, воде присущ эффект смешения фаз. Так, в любом макроскопическом объеме льда всегда присутствует то или иное количество воды в жидком состоянии, а также содержатся различные газы, включая и водяной пар. Аналогично в любом макроскопическом объеме жидкой фазы воды всегда содержатся различные газовые составляющие в растворенном, а иногда и в свободном виде. Отмечая этот факт, В.И. Вернадский, например, писал, что «в окружающей природе мы нигде не имеем газа, не связанного с водой, водного раствора, не заключающего газа» [8, с. 18]. Он особо подчеркивал, что «с газами единая масса жидкой воды образует единое для всей планеты динамическое равновесие: природные газы ↔ природные воды. Газы растворяются в воде — вода испаряется в газовую земную оболочку» [8, с. 18].

Важно отметить, что количество того или иного газа, растворенного в воде, изменяется в зависимости от колебаний ее температуры и внешнего давления. При понижении, например, температуры воды количество растворенных в ней газов увеличивается, т. е. тот или иной макроскопический объем жидкой фазы воды является в этом случае своеобразным абсорбентом для различных газов. При повышении температуры воды количество растворенных в ней газов уменьшается. В результате этого происходит удаление определенного количества растворенных газов из жидкой фазы объемной воды в виде спонтанных или постоянных газовыделений. Все это касается как молекулярных газов,

растворенных в воде (метана, сероводорода, углекислого газа и т. д.), так и атомарных газов, из которых состоит молекула воды, а именно водорода и кислорода. Содержание последних и их изотопов также изменяется в зависимости от температуры жидкой фазы воды и внешнего давления.

Помимо газовых составляющих в жидкой фазе объемной воды при определенных температурах и давлении отмечается своеобразное присутствие ее твердой фазы. Это связано с особыми структурными свойствами объемной воды. Установлено, например, что при переходе воды из твердого состояния в жидкое кристаллическая решетка льда разрушается не полностью, поэтому часть молекул сохраняют регулярную структуру [5, 10]. С дальнейшим повышением температуры воды количество таких молекул уменьшается. Полное исчезновение кристаллической структуры в жидкой фазе объемной воды происходит при достаточно высокой ее температуре — около 37–42 °С.

Таким образом, основные молекулярно-агрегатные состояния воды отражают лишь макроскопическую ее фазовую гомогенность, характеризуя свойства той или иной фазы объемной воды как сплошной среды. С микроскопической же точки зрения основные молекулярно-агрегатные состояния воды являются фазово-гетерогенными. Подобный фазовый состав объемной воды во многом можно объяснить тем, что в природе нет абсолютно чистой воды ни в твердом, ни в жидком, ни в газообразном состоянии. Вода в любом макроскопическом объеме — это прежде всего дисперсионная среда, в которой содержатся различные химические вещества в виде ионных и других соединений, а также диспергированы различные микропримеси в виде твердых взвесей, коллоидных частиц, зелей и т. д. Повышенная энергия поверхностного натяжения этих микрочастиц обуславливает формирование на их поверхности своеобразных микрофаз воды, которые могут отличаться от основного ее молекулярно-агрегатного состояния. Подобные микрочастицы служат, в частности, центрами кристаллизации, конденсации и десублимации, т. е. являются фазовыми катализаторами при переходах воды из одного агрегатного состояния в другое. Фазовая неоднородность основных агрегатных состояний воды вызывает различные дисперсионные эффекты (кинетические, электрические, электрохимические и др.). Все это не только изменяет свойства, состав и структуру воды, но и существенно осложняет исследование подобных гидродинамических систем. Именно по данной причине изучение, например, двухфазных газожидкостных систем ведется в основном в гомогенном приближении, когда параметры и характеристики фазово-неоднородной системы различными способами осредняются. Это, несомненно, приводит к определенным погрешностям при расчетах процессов тепло- и водообмена в подобных системах.

В горных породах характер межфазовых взаимодействий воды особенно сложен, поскольку отмеченная выше фазовая дисперсия воды в любом ее молекулярно-агрегатном состоянии как бы усиливается механической дисперсией горнопородной среды. Известно, что все горные породы — это прежде всего дисперсные системы. Согласно терминологии и принципам теории дисперсных систем, воду, содержащуюся в горных породах как в жидком, так и в твердом и газообразном состоянии, рассматривают обычно в качестве дисперсной фазы по отношению к дисперсионной горнопородной среде. Однако, учитывая фазово-гетерогенный состав основных молекулярно-агрегатных состояний воды, а также то обстоятельство, что вода является подвижным компонентом в литосфере, правомерно говорить о дисперсионной водной среде. Так, например, пленочную воду в зоне аэрации горных пород можно рассматривать в качестве дисперсионной среды, находящейся в активном межфазовом взаимодействии с порово-воздушной горно-породной средой. Аналогично и связанную незамерзшую воду в мерзлых льдонасыщенных горных породах правомерно рассматривать в качестве дисперсионной среды, находящейся в подвижном межфазовом взаимодействии с порово-ледовой средой горных пород. Фазовые переходы незамерзшей воды в лед и обратно происходят в горных породах при отрицательной их температуре под воздействием даже незначительных ее колебаний или изменениях внешнего давления, обуславливая тем самым межфазовый водообмен.

Имея по своей физической сущности молекулярно-кинетическую природу, фазовые переходы и межфазовые переносы воды тем не менее лежат в основе развития многих важнейших макропроцессов, происходящих в различных геосферах Земли. Эти циклически протекающие агрегатные превращения воды определяют не только существенное преобразование почв, горных пород и ландшафтной сферы нашей планеты, но и во многом круговорот природных вод, их единство и своеобразие взаимосвязи гидросферы с атмосферой, литосферой, биосферой и климатической системой нашей планеты. С фазовыми переходами воды связаны особенности формирования водного и теплового баланса Земли и отдельных ее регионов, районов и участков, а также динамика сезонных и многолетних образований поверхностного и подземного льда, снежного покрова, жизнедеятельность растений, животных и т. д.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее нами уже указывалось на необходимость пересмотра существующих схем общего круговорота природных вод с учетом огромной роли фазовых переходов и межфазовых взаимодействий воды в формировании различных циклов водообмена [11]. Прежде всего следует конкретизировать схему климатического (гидрологического) круговорота природных вод, играющего важнейшую роль в формировании водного и теплового баланса Земли и ее климатической системы. В имеющихся схемах климатический (гидрологический) круговорот природных вод подразделяется на атмосферный (атмогенный) цикл и циклы поверхностного и подземного стоков [12–16]. Перечисленные циклы выделены на основе различных принципов. Так, если атмосферный (атмогенный) цикл выделен с учетом фазовых переходов воды из жидкого состояния в газообразное и обратно, то два следующих цикла, по существу, характеризуют лишь различные виды или пути транспорта атмосферных осадков, выпадающих на земную поверхность.

Автором предлагается на основе учета фазовых переходов и межфазовых взаимодействий воды выделять в климатическом (гидрологическом) круговороте природных вод, помимо атмосферного (атмогенного), следующие циклы водообмена: криогидрогенный, атмолитогенный, гляциогенный и криолитогенный (табл. 1).

Данные циклы климатического (гидрологического) круговорота природных вод обусловлены различными видами их фазовых переходов и межфазовыми переносами.

Криогидрогенный цикл определен ежегодным формированием на поверхности Земли снежного покрова, льда на реках и водоемах, наледей, а также подземного льда в деятельном слое криолитозоны с последующим таянием этих сезонных образований снега и льда в теплый период года.

Атмолитогенный цикл связан с испарением и конденсацией, сублимацией и десублимацией влаги в зоне аэрации горных пород, представляющей своеобразную подземную атмосферу, в пределах которой осуществляется достаточно интенсивный влагоперенос, определяющий взаимосвязь атмосферы с литосферой.

Гляциогенный и криолитогенный циклы водообмена обусловлены уже не сезонными колебаниями приземной температуры воздуха, а многолетними колебаниями климата. В периоды похолодания, например, происходит увеличение объемов твердой фазы воды в ледниковых покровах и в криолитозоне. В периоды потепления климата, напротив, увеличиваются ресурсы жидкой фазы воды, образуемой при многолетнем таянии ледников (гляциогенный цикл) и подземных льдов криолитозоны (криолитогенный цикл). Следовательно, эти циклы водообмена оказывают трендовый характер воздействия на годовой баланс жидкой фазы природных вод, способствуя многолетнему понижению или повышению их уровня и общих ресурсов. При этом следует иметь в виду, что наземное и подземное оледенения не могут быть абсолютно синхронными по времени в связи с инерционностью криолитозоны на колебания климата.

Для сравнительной количественной оценки выделенных циклов климатического круговорота природных вод в табл. 1 приведены средняя интенсивность и энергетика их водообмена, рассчитанные на основе анализа имеющихся данных о количестве и балансе различных видов природных вод на Земле [12–22], включая наши предыдущие исследования [23, 24]. Стоит отметить, что точность современных количественных оценок отдельных циклов и звеньев круговорота природных вод в целом пока очень низка (табл. 2). Связано это со сложностью проведения подобных оценок не только на глобальном, но и на региональном и локальном уровнях, а также с недостаточно разработанной методикой получения исходных данных. Так, в настоящее время чрезвычайно слабо изучена водообменная функция зоны аэрации горных пород, поэтому интенсивность атмолитогенного цикла оценена очень приближенно. Это указывает на важность работ по исследованию особенностей влагопереноса

Таблица 1

Интенсивность и энергетика глобальных циклов климатического (гидрологического) круговорота природных вод

Основные циклы	Масса воды, ежегодно участвующая в водообмене, кг	Средняя интенсивность водообмена, кг·м ⁻² ·с ⁻¹	Мощность выделяемой (+) или затрачиваемой (–) энергии, Вт
Атмосферный	0,51·10 ¹⁸	31,5·10 ⁻⁶	±4,06·10 ¹⁶
Криогидрогенный	2,6·10 ¹⁶	1,6·10 ⁻⁶	±2,76·10 ¹⁴
Атмолитогенный	0,2·10 ¹¹	0,42·10 ⁻¹¹	±0,16·10 ¹⁰
Гляциогенный	0,25·10 ¹⁶	0,16·10 ⁻⁶	–0,26·10 ¹⁴
Криолитогенный	25·10 ¹²	1,6·10 ⁻⁹	–2,6·10 ¹¹

Таблица 2

Точность современных количественных оценок различных звеньев круговорота природных вод [21]

Вид вод	Точность оценки, %
Воды океана	1
Подземные воды (включая почвенную влагу)	50
Ледники и снег	15
Подземные льды	50
Поверхностные воды	10
Атмосферные воды	<10
Биогенные воды	Подсчеты приблизительные

в зоне аэрации горных пород и организации специальных наблюдений для количественной оценки данного цикла водообмена на локальном, региональном и глобальном уровнях.

Основные агрегатные состояния воды, по сути, можно представить как различные квантовые уровни ее организации как сложной каталитической системы. Если, например, твердое состояние воды принять за основной уровень ее молекулярной и структурной организации, а остальные — за возбужденные, то переход на более высокий уровень будет возможен лишь при передаче данной системе определенной порции тепловой энергии. Переход на нижний уровень будет сопровождаться выделением такого же количества тепловой энергии (теплоты фазовых переходов). Следовательно, эндотермические фазовые переходы воды (плавление, испарение, сублимация) можно назвать вынужденными процессами, поскольку протекают они только при поступлении в водную систему дополнительной тепловой энергии, которая расходуется на уменьшение молекулярной и структурной упорядоченности системы и рост ее энтропии. В свою очередь, экзотермические фазовые переходы воды (льдообразование, конденсация, десублимация) являются самопроизвольными процессами и направлены на повышение степени упорядоченности водной системы и уменьшение ее энтропии.

Важно отметить, что при равновесных изменениях внешних температурных условий, когда, например, ежегодный объем жидкой фазы воды, переходящий в твердое или газообразное состояние, соответствует объему ее обратного перехода в жидкую фазу, приход и потери тепла фазовых переходов как бы компенсируются. Однако при таких неравновесных изменениях внешних условий, как, например, потепление или похолодание климата, будут происходить, соответственно, ежегодные потери или накопление тепловой энергии фазовых переходов воды. Тем самым природные воды выступают в качестве своеобразного теплового регулятора или амортизатора, сглаживая воздействие отдельных внешних факторов на климатическую систему нашей планеты.

Таким образом, фазовые переходы воды не только обуславливают различные циклы водообмена, но и играют существенную роль в процессах энергообмена (см. табл. 1). Так, энергия, выделяемая за год при конденсации влаги в атмосфере ($4,06 \cdot 10^{16}$ Вт), относительно немного уступает годовому количеству лучистой энергии, приходящей к внешней границе тропосферы ($17,4 \cdot 10^{16}$ Вт). Достаточно высока энергетика и таких выделенных глобальных циклов климатического круговорота природных вод, как криогидрогенный и гляциогенный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют заключить, что фазовые переходы воды, активность которых очень высока в существующих температурных и барических условиях нашей планеты, играют основополагающую роль в глобальных водообменных циклах. При этом как фазовые переходы воды, так и межфазовые ее переносы, происходящие на микроскопическом уровне, не только стимулируют проявление и определяют специфику развития этих процессов на макроскопическом уровне, но и обуславливают динамическую взаимосвязь между различными формами залегания, состояния и связности воды. Сделанное нами утверждение о том, что основные агрегатные состояния воды (лед, жидкость, пар) являются не фазово-гомогенными, а фазово-гетерогенными, определяет как существенное значение принципа единства природных вод, так и особенности формирования их ресурсов, энергетика и баланса.

Следует подчеркнуть, что круговороты воды, обусловленные ее фазовыми переходами и переносами, влияют не только на водообменные и теплообменные процессы, но и на изменение качественного состава природных вод. При испарении и последующей конденсации воды, например, осуществляется дистилляция, способствующая удалению разных примесей и растворенных в воде газов, уменьшению концентрации ионов и т. д. При кристаллизации жидкой фазы воды и последующем таянии льда также происходят существенная трансформация состава и изменение минерализации исходной воды, что приводит, в частности, к улучшению ее питьевых качеств. Следовательно, те циклы водообмена, которые обусловлены фазовыми переходами и межфазовыми переносами,

представляют собой своеобразные естественные механизмы очистки и регенерации воды. В этом отношении, безусловно, правы те исследователи, которые утверждают, что наиболее глубокие экологические события происходят тогда, когда нарушаются глобальные циклы круговорота природных вод. Все это свидетельствует о необходимости дальнейшего углубленного изучения циклической природы планетарного водообмена и его роли в развитии различных глобальных процессов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (20–05–00670А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шварцев С.Л.** Круговорот воды в недрах Земли // Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология. — Новосибирск: Наука, 1980. — С. 81–99.
2. **Соколов Б.Л.** Новые результаты исследований литогенной составляющей речного стока // Водные ресурсы. — 1996. — Т. 23, № 3. — С. 278–287.
3. **Найденов В.И., Швейкин В.И.** О возможном влиянии вод суши на устойчивость земной климатической системы // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже тысячелетий. — Томск: Изд-во НТЛ, 2000. — С. 47–50.
4. **Зекцер И.С.** Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод. — М.: Научный мир, 2012. — 344 с.
5. **Андреев И.Л.** Водный наноподфундамент жизни и здоровья человека // Вестн. РАН. — 2017. — Т. 87, № 2. — С. 145–153.
6. **Шварцев С.Л.** Созидательная функция воды в окружающем мире // Подземные воды востока России: Материалы всероссийского совещания. — Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2018. — С. 42–46.
7. **Кершенгольц Б.М., Чернобровкина Т.В.** Вода и процессы самоорганизации систем. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2019. — 151 с.
8. **Вернадский В.И.** Избранные сочинения. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — Т. 4, кн. 2. — 651 с.
9. **Baumgartner A., Reichel E.** World Water Balance. — Gentbrugge; Paris; Geneve: UNESCO – WMO, 1972. — 580 p.
10. **Антонченко В.Е., Давыдов А.С., Ильин В.В.** Основы физики воды. — Киев: Наук. думка, 1991. — 672 с.
11. **Шепелёв В.В.** О круговороте природных вод // Водные ресурсы. — 2001. — Т. 28, № 4. — С. 418–423.
12. **Келлер Р.** Вода и водный баланс суши. — М.: Прогресс, 1965. — 435 с.
13. **Алпатьев А.М.** Влагодобороты в природе. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 269 с.
14. **Varri R.G.** Water, Earth and Man. — London, 1969. — 588 p.
15. **The Waters Encyclopedia / Ed. D.K. Todd.** — Washington, 1970. — 559 p.
16. **Львович М.И.** Мировые водные ресурсы и их будущее. — М.: Мысль, 1974. — 446 с.
17. **Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли.** — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 638 с.
18. **Water Resources and WMO.** — Geneve: WMO, 1986. — 38 p.
19. **Глобальные изменения природной среды / Отв. ред. Н.Л. Добрецов, В.И. Коваленко.** — М.: Научный мир, 2000. — 546 с.
20. **Добровольский С.Г.** Климатические изменения в системе гидросфера–атмосфера. — М.: ГЕОС, 2002. — 231 с.
21. **Современные глобальные изменения природной среды / Отв. ред. Н.С. Касимов, Р.К. Клиге.** — М.: Научный мир, 2006. — Т. 1. — 696 с.
22. **Современные глобальные изменения природной среды / Отв. ред. Н.С. Касимов, Р.К. Клиге.** — М.: Научный мир, 2012. — Т. 4. — 540 с.
23. **Шепелёв В.В.** Надмерзлотные воды криолитозоны. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2011. — 169 с.
24. **Шепелёв В.В.** О водообменной функции криолитозоны // Устойчивость природных и техногенных систем в криолитозоне: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2020. — С. 330–335.

Поступила в редакцию 29.10.2019

После доработки 18.02.2021

Принята к публикации 29.12.2021