

УДК 556.3.01

DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.401

**О РОЛИ АТМОСФЕРНОГО
ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ
ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА**

С.А. Лавров, М.Л. Марков,

Т.В. Скороспехова

*Государственный гидрологический институт,
г. Санкт-Петербург, Россия*

2014mml@gmail.com

**ON THE ROLE OF ATMOSPHERIC
PRESSURE IN THE PROCESS OF
RUNOFF FORMATION**

Sergei A. Lavrov, Mikhail L. Markov,

Tatyana V. Skorospikhova

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

2014mml@gmail.com

Аннотация. В публикациях различных авторов показано, что изменение атмосферного давления оказывает влияние на уровень воды в наблюдательных скважинах, колодцах, дебит родников и питание водотоков подземными водами. Однако механизмы данного явления до сих пор полностью не раскрыты. В ряде работ отмечается, что наблюдается резкое увеличение дебита родников или стока малых водотоков при резком падении атмосферного давления, даже в случаях отсутствия осадков. Результаты исследований показали, что кроме гравитационной силы в движении грунтовых вод и формировании подземного питания рек и озер определенную роль играет еще одна сила – разница давлений атмосферного воздуха и воздуха в зоне аэрации над водоносным горизонтом. В журнале «Гидросфера. Опасные процессы и явления» (Том 3. Выпуск 3) опубликована статья коллектива авторов, в которой выдвинута гипотеза о наличии барического эффекта воздействия атмосферы на влагоемкость органогенных горизонтов тундровых почв. Согласно выдвинутому предположению при уменьшении атмосферного давления возрастает капиллярная влагоемкость тундровых почв, вмещающих водоносный горизонт, его водоотдача уменьшается, а это понижает уровень воды в шурфах и снижает надмерзлотный сток. При резком повышении давления и сокращении влагоемкости почв происходит сброс удерживаемой влаги, что, с учетом текущего питания горизонта талыми водами, приводит к скачку надмерзлотного и восстановлению речного стока. Предложенная в

Abstract. It is known that changes in atmospheric pressure affect the water level in observation wells, wells, the flow rate of springs and the supply of groundwater to watercourses. The mechanisms of this phenomenon have not yet been fully disclosed. In the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena," (volume 3, issue 3) an article by a team of authors has been published, in which a hypothesis has been put forward about the presence of a baric effect of atmospheric influence on the moisture capacity of organogenic horizons of tundra soils. According to the proposed assumption, with a decrease in atmospheric pressure, the capillary moisture capacity of tundra soils containing an aquifer increases, its water output decreases, and this lowers the water level in the pits and reduces the permafrost runoff. With a sharp increase in pressure and a reduction in the moisture capacity of soils, the retained moisture is discharged, which, taking into account the current supply of the horizon with meltwater, leads to a jump in the permafrost and restoration of river runoff. The interpretation of the data of short-term field observations proposed in the article is questionable. Considering that the described effect is still poorly understood and a comprehensive discussion is needed to understand it, this article presents considerations on the debatable issues raised about the role of atmospheric pressure in the formation of river runoff.

статье интерпретация данных кратковременных полевых наблюдений вызывает сомнения. Учитывая то, что описываемый эффект еще плохо изучен и для его понимания необходимо всестороннее обсуждение, в данной статье высказаны соображения по затронутым дискуссионным вопросам о роли атмосферного давления в формировании речного стока.

Ключевые слова: давление атмосферного воздуха; сток рек; болота; подземные и поверхностные воды; внутриводная вода; капиллярная влагоемкость почв; изолированный внутриводный воздух; зона аэрации; полевые изыскания.

Введение

Экспериментальные исследования, которые выполняются в последние десятилетия с использованием новых средств автоматических измерений и наблюдений, позволили получать большой объем информации о процессах формирования стока на малых водосборах. Следует констатировать, что их результаты указывают на наличие гидрологических явлений, которые ранее не фиксировались или им не придавали большого значения. Одно из таких явлений связано с влиянием изменения атмосферного давления на водный режим рек в целом и взаимосвязь поверхностных и подземных вод в частности. Это явление отражено в ряде публикаций [King, 1892; Каменский и др., 1938; Turk, 1975; Quilty, Roeloffs, 1991; Соколов, Завилейский, Марунич, 1994; Hare, Morse, 1997; Rasmussen, Crawford, 1997; Марунич, Завилейский, Ливанова, 1998; Spane, 2002; Zhuravin, Markov, 2010; Лавров, Марков, 2018 и другие]. В них отмечается, что наблюдается резкое увеличение дебита родников или стока малых водотоков при резком падении атмосферного давления, даже в случаях отсутствия осадков.

К сожалению, в дальнейшем этому явлению практически не уделялось должного внимания в научных публикациях, посвященных изучению гидрологических процессов. К этой теме снова

Keywords: atmospheric air pressure; river runoff; swamps; underground and surface waters; in-pore water; capillary moisture capacity of soils; isolated in-pore air; aeration zone; field surveys.

вспыхнул интерес после публикации [Трегубов и др., 2021]. Авторы этой статьи на основе данных гидрометеорологических наблюдений с 29 июня по 10 июля 2019 года в бассейне реки Угольная-Дионисия (Анадырская низменность) выдвинули рабочую гипотезу о наличии «...барического эффекта воздействия атмосферы на влагоемкость органогенных горизонтов тундровых почв. Согласно выдвинутому предположению при уменьшении атмосферного давления возрастает капиллярная влагоемкость тундровых почв, вмещающих водоносный горизонт, его водоотдача уменьшается, а это понижает уровень воды в шурфах и снижает надмерзлотный сток. При резком повышении давления и сокращении влагоемкости почв происходит сброс удерживаемой влаги, что с учетом текущего питания горизонта талыми водами приводит к скачку надмерзлотного и восстановлению речного стока. Описываемый механизм полностью соответствует наблюдаемой динамике уровня воды в шурфах и водотоках».

По нашему мнению, выдвинутая гипотеза недостаточно подкреплена данными и есть противоречие в ее обосновании. В данной статье мы рассматриваем спорные аспекты в интерпретации данных наблюдений в бассейне реки Угольная-Дионисия и высказываем собственный взгляд на это явление, пока еще остающееся в плоскости дискуссионных обсуждений.

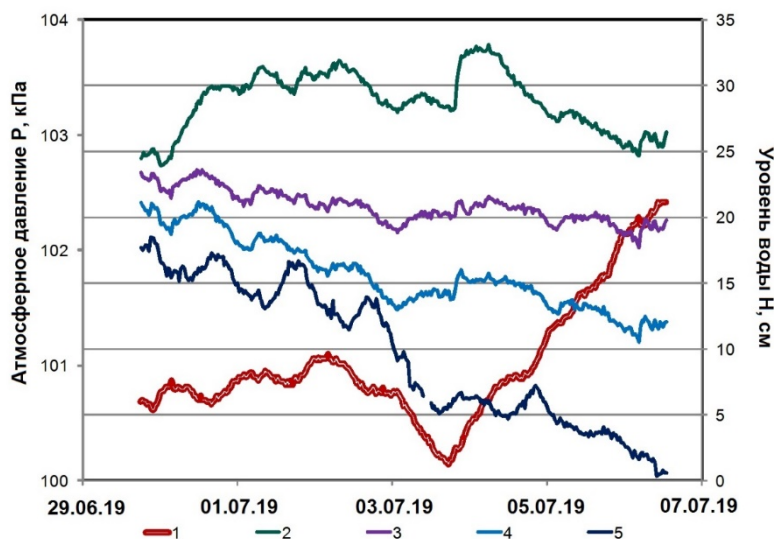


Рисунок 1. Динамика уровня надмерзлотных вод и поверхностных водотоков при изменении атмосферного давления: 1 – атмосферное давление; 2 – шурф в торфяной почве в борту склоновой ложбины; 3 – шурф в торфянистой почве в днище склоновой ложбины; 4 – уровень воды в ручье Ягодный; 5 – уровень воды в реке Угольная-Дионисия [Трегубов и др., 2021].

Figure 1. Dynamics of the level of supraperafrost waters and surface watercourses with a change in atmospheric pressure: 1 – atmospheric pressure; 2 – pit in peat soil in the side of the slope hollow; 3 – pit in peaty soil in the bottom of the slope hollow; 4 – water level in the Yagodny brook; 5 – level of water in the Ugolnaya-Dionisia river [Tregubov et al., 2021].

Обсуждение результатов исследований дискуссионных

Рассмотрим рисунок 1, взятый из публикации [Трегубов и др., 2021]. Явного влияния величины атмосферного давления на характер изменения уровня воды в шурфах и ручьях не прослеживается. Если в период с 2.07.2019 по 4.07.2019 наблюдаются общие тенденции снижения давления и уровней воды, то в период с 5.07.2019 по 7.07.2019 тенденции становятся противоположными.

По графику на рисунке 1 видна высокая синхронность колебаний уровня воды в ручье Ягодный с уровнями воды в шурфах. Это прежде всего указывает на сильную гидравлическую связь водных объектов. Поэтому, скорее всего, уровень воды в ручье определяет уровни воды в шурфах, а не наоборот. В связи с этим надо более внимательно рассмотреть все факторы формирования стока в ручье Ягодный.

Рост уровня в шурфе в торфянистой почве (3) и уровень воды в ручье Ягодный (4) начали расти при снижении атмосферного

давления. Начало роста уровня в шурфе в торфяной почве (2) произошло несколько позже, но тоже до начала подъема атмосферного давления. На реке Угольная-Дионисия рост уровня среагировал на снижение давления с запаздыванием на 1–3 часа, что можно объяснить временем добегания грунтовых (болотных) вод в торфяных отложениях.

Не оспаривается высказанный в статье факт, что колебания атмосферного давления воздуха оказывают влияние при определенных условиях на уровень грунтовых вод в наблюдательных скважинах или шурфах. Но сделанный авторами статьи вывод стал неожиданным, так как он указывает на противоположный эффект изменения питания рек грунтовыми (болотными) водами при изменении атмосферного давления.

Несмотря на спорность мнения авторов статьи [Трегубов и др., 2021], которые утверждают, что при падении атмосферного давления наблюдается синхронное падение уровня грунтовых вод и соответственно стока, попытаемся встать на их точку зрения. Данный

факт ими объясняется тем, что при уменьшении атмосферного давления возрастает капиллярная влагоемкость почв, вмещающих водоносный горизонт, его водоотдача уменьшается, а это понижает уровень воды в шурфах и снижает надмерзлотный сток. Отметим, что капиллярная влагоемкость почвы зависит от ее структуры, например от плотности и общей пористости. Аналог данного эффекта можно представить следующим образом. У нас имеется насыщенная водой губка (слой торфа), при росте внешнего давления она сжимается и отдает воду и наоборот.

Однако в соответствии с законом Паскаля, давление, производимое на жидкость или газ, передается во всех направлениях в любую точку без изменений как снаружи, так и изнутри. Поэтому мы никогда не наблюдали, чтобы при изменении атмосферного давления губка сжималась или расширялась, тем самым выдавливая или впитывая воду. Тем не менее имеется эффект уменьшения объема сред, слагающих торфяную залежь (вода, воздух, вещество частиц почвы) при росте давления со всех сторон (их сжатие). Например, уменьшение объема воздушных пузырьков при их сжатии приводит к дополнительному всасыванию в

пористое пространство и падению уровня грунтовых вод, что и было показано в работе [Лавров, Марков, 2018]. Точно также сжатие внутриводной воды и частиц почвы может привести только к дополнительному впитыванию влаги.

Приведем еще пример из гидрогеологии. При исследованиях подземных вод колебания уровня воды в скважине, вызванные изменениями атмосферного давления, характеризуются барометрической эффективностью – параметром, который ввел в 1940 году Якоб [Jacob, 1940]. Барометрическая эффективность BE определяется как отношение изменений уровня воды ΔWL в скважинах, к соответствующим изменениям барометрического давления ΔP_A :

$$BE = -\frac{\Delta WL}{\Delta P_A} \quad (1)$$

где ΔWL выражается в тех же единицах, что и ΔP_A .

Барометрическая эффективность является функцией пористости и сжимаемости водоносного горизонта и воды [Spane, 2002]. Знак «минус» в формуле (1) означает, что при росте атмосферного давления всегда наблюдается падение уровня грунтовых вод и наоборот.

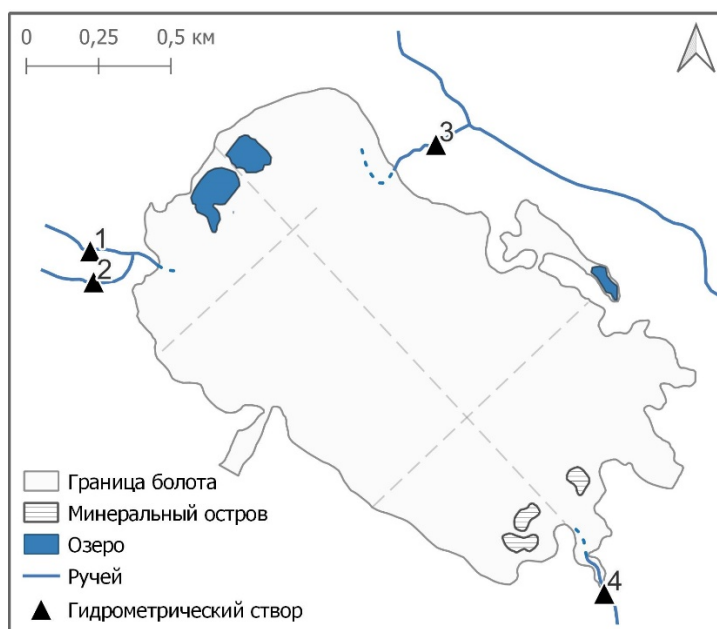


Рисунок 2. Схема расположения гидрометрических створов на водотоках, вытекающих из болота Ламмин-Суо. Водотоки: 1, 2 – Западный; 3 – Северный; 4 – Южный.

Figure 2. A diagram of the location of hydrometric gates on watercourses flowing out of the Lammin-Suo swamp. Watercourses: 1, 2 – Western; 3 – Northern; 4 – Southern.



Рисунок 3. Изменение давления атмосферного воздуха и стока болотных вод на ручьях Южном, Западном 1 и Северном, вытекающих из болота Ламмин-Суо в периоды отсутствия дождей в разные годы.

Figure 3. Changes in atmospheric air pressure and swamp water runoff on the Southern, Western-1 and Northern streams flowing from the Lammin-Suo swamp during periods of absence of rains in different years.

Таким образом, выводы, сделанные в работе [Трегубов и др., 2021], противоречат общепризнанным наблюдениям и их трактовке с точки зрения физики процесса. Главное, что в работе был декларирован эффект влияния давления на капиллярную влагоемкость, но физически не был обоснован.

Дополнительно для проверки выдвинутой авторами работы [Трегубов и др., 2021] гипотезы

о влиянии атмосферного давления на сток болотных вод нами был проведен анализ архивных материалов наблюдений за стоком с болота Ламмин-Суо (Карельский перешеек) (рисунок 2) и давлением атмосферного воздуха. Были выбраны продолжительные промежутки времени, в которые отсутствовали атмосферные осадки и происходили существенные изменения в атмосферном давлении. Многочисленные

примеры показали, что на сток болотных вод ни падение, ни рост атмосферного давления влияния не оказывают (рисунок 3).

Другими примерами обратной реакции стока к изменению атмосферного давления при отсутствии атмосферных осадков могут быть данные наблюдений за стоком экспериментальных водосборов Государственного гидрологического института на Валдайской возвышенности [Соколов, Завилейский, Марунич, 1994; Марунич, Завилейский, Ливанова, 1998; Zhuravin, Markov, 2010]. На рисунке 4 показано, что изменение атмосферного давления за 12 часов на 15 мб привело к росту стока в ручье до 5 л/с, а более плавное изменение за 2 суток – на 2 л/с.

В 2008 году на болотной станции Государственного гидрологического института Ламмин-Суо выполнены детальные наблюдения за ходом давления в зоне аэрации (в скважине) и за всем комплексом метеоусловий в районе эксперимента (атмосферное давление, уровень подземных вод, температура воздуха, атмосферные осадки, погодные условия). Наблюдения за уровнем подземных вод проводились в двух скважинах со средней глубиной их залегания 5,5 и 7,5 м. В результате были выявлены синхронные колебания расстояния от поверхности почвы до уровня грунтовых вод и атмосферного давления на обеих скважинах. На рисунке 5 представлены результаты наблюдений на одной из скважин. Уравнение регрессии представленной зависимости следующее:

$$H_{\text{гр}} = 0,7P_A + 68,0 \quad (2)$$

где $H_{\text{гр}}$ – расстояние от поверхности почвы до уровня грунтовых вод;

P_A – атмосферное давление.

Коэффициент корреляции данной связи равен $R = 0,93$, то есть очень высокий.

Из уравнения (2) следует, что при изменении атмосферного давления на 1 мб, уровень подземных вод изменяется на 0,7 см. При росте давления он понижается, а при падении – повышается. Аналогичные результаты были

получены и для второй скважины. Изменение уровня $\Delta H_{\text{гр}}$ также составило $0,7\Delta P_A$.

Физическое обоснование данных закономерностей следующее. Изменения величины атмосферного давления передаются через водную среду на изолированные воздушные пузырьки, находящиеся непосредственно над зоной грунтовых вод. Соответственно при росте давления P_A пузырьки сжимаются и их объем уменьшается, а при падении давления объем воздушных пузырьков растет. Это приводит в первом случае к падению уровня воды в скважинах/колодцах и снижению интенсивности разгрузки подземных вод в дрены (поверхностные водные объекты). Во втором случае, наоборот, рост объема воздушных пузырьков ведет к вытеснению воды из водонасыщенной зоны и подъему уровня грунтовых вод в скважинах/колодцах, и соответственно к росту стока в родниках и подземного питания водотоков. Изменение давления приводит к возникновению фильтрационных потоков, и в первую очередь по каналам с наибольшей гидравлической проводимостью.

Таким образом, все полученные нами экспериментальные результаты о влиянии атмосферного давления на уровень грунтовых вод и их разгрузку в поверхностные водные объекты находятся в полном соответствии с результатами исследований о влиянии изменения давления атмосферного воздуха на динамику подземных вод, которое характеризуется барометрической эффективностью [King, 1892; Quilty, Roeloffs, 1991; Hare, Morse, 1997; Rasmussen, Crawford, 1997; Spane, 2002].

Следует отметить, что полевые и лабораторные эксперименты показывают, что уровень грунтовых вод изменяется не только под воздействием атмосферного давления, но и других факторов. К ним относятся температура грунта, процессы испарения – конденсации в летний период и миграции влаги в зимний период [Лавров, Марков, 2018]. Тем самым все эти факторы также определяют разгрузку грунтовых вод в поверхностные водные объекты.

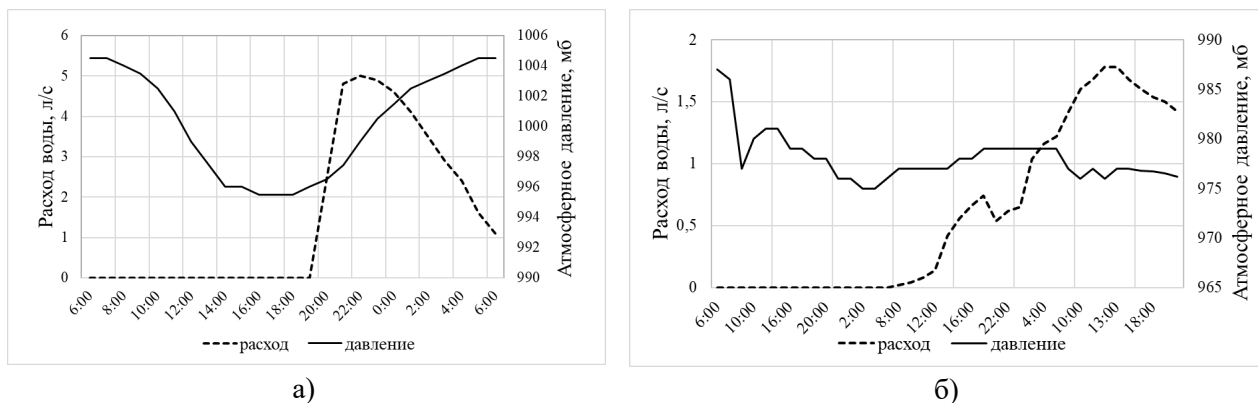


Рисунок 4. Суточный ход атмосферного давления и расхода воды в логе Усадьевском при отсутствии осадков: а) 4–5 августа 1988 года; б) 8–10 июля 1987 года.

Figure 4. Daily course of atmospheric pressure and water flow in the Usadyevsky log in the absence of precipitation: a) August 4–5, 1988; b) July 8–10, 1987.

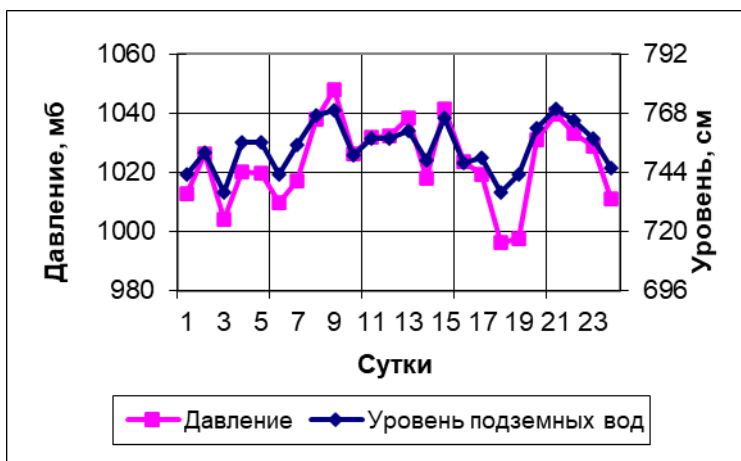


Рисунок 5. Совместный ход атмосферного давления и расстояния до уровня подземных вод в скважине.

Figure 5. The collateral course of atmospheric pressure and distance to the level of underground waters in the well.

Выводы

Выдвинутая в [Трегубов и др., 2021] гипотеза о воздействии атмосферного давления на уровень грунтовых вод посредством изменения влагоемкости торфа при его пластично-упругой деформации не находит подтверждения в режиме стока с верховых болот. Она противоречит выявленным физическим процессам, происходящим в почво-грунтах и торфе при изменении атмосферного давления.

Решающую роль в реакции разгрузки подземных вод в реки на изменение атмосферного давления играет расположенная над зеркалом грунтовых вод область с заземленным внутриводным воздухом. При росте

атмосферного давления объем воздуха уменьшается, а при падении – увеличивается. Это, в свою очередь, приводит в первом случае к оттоку влаги из насыщенной зоны и к падению их уровня, а во втором случае к обратным последствиям.

Вместе с тем, соглашаясь с авторами [Трегубов и др., 2021], что в области речной гидрологии (да и гидрогеологии) описанный эффект недостаточно изучен на практике и «вопрос о роли атмосферного давления в формировании речного стока следует признать плохо разработанным». Для решения этого вопроса требуются дальнейшие экспериментальные исследования.

Литература

- Каменский Г.Н., Биндеман Н.Н., Вевировская М.А., Альтовский М.Е. Режим подземных вод. М.-Л.: ГОНТИ, Главная редакция строительной литературы, 1938. 192 с.
- Лавров С.А., Марков М.Л. Оценка влияния атмосферного давления на уровень и сток грунтовых вод // Инженерные изыскания. 2018. Т. XII. № 11–12. С. 44–51. DOI: [10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51](https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51).
- Марунич С.В., Завилейский С.В., Ливанова Н.А. Влияние изменения атмосферного давления на формирование речного стока // Известия Академии наук. Серия географическая. 1998. № 1. С. 111–115.
- Соколов Б.Л., Завилейский С.В., Марунич С.В. Экспериментальные исследования процессов формирования речного стока малых водосборов // Метеорология и гидрология. 1994. № 10. С. 82–91.
- Трегубов О.Д., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Лебедева Л.С., Тарбеева А.М. Реакция стока малых рек и надмерзлотных вод Анадырской низменности на перепады атмосферного давления // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3. Вып. 3. С. 297–309. DOI: [10.34753/HS.2021.3.3.297](https://doi.org/10.34753/HS.2021.3.3.297).
- Hare P.W., Morse R.E. Water-level fluctuations due to barometric pressure changes in an isolated portion of an unconfined aquifer // *Ground Water*. 1997. Vol. 35. Iss. 4. Pp. 667–671. DOI: [10.1111/j.1745-6584.1997.tb00132.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00132.x).
- Jacob C.E. On the flow of water in an elastic artesian aquifer // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 1940. Vol. 21. Iss. 2. Pp. 574–586. DOI: [10.1029/TR021i002p00574](https://doi.org/10.1029/TR021i002p00574).
- King Fr. Observations and experiments on the fluctuations in the level and rate of movement of ground water on the Wisconsin agricultural experiment station farm and at Whitewater, Wisconsin. US Department of agriculture weather bureau. Bulletin №5. Washington DC, Weather Bureau, 1892. 92 p.
- Quilty E.G., Roeloffs E.A. Removal of barometric pressure response from water level data // *Journal of Geophysical Research*, 1991, vol. 96, iss. B6, pp. 10209–10218. DOI: [10.1029/91JB00429](https://doi.org/10.1029/91JB00429).
- Rasmussen T.C., Crawford L.A. Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers. *Ground Water*,

References

- Hare P.W., Morse R.E. Water-level fluctuations due to barometric pressure changes in an isolated portion of an unconfined aquifer. *Ground Water*, 1997, vol. 35, iss. 4, pp. 667–671. DOI: [10.1111/j.1745-6584.1997.tb00132.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00132.x).
- Jacob C.E. On the flow of water in an elastic artesian aquifer. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1940, vol. 21, iss. 2, pp. 574–586. DOI: [10.1029/TR021i002p00574](https://doi.org/10.1029/TR021i002p00574).
- Kamensky G.N., Bindeman N.N., Veviorovskaya M.A., Altovsky M.E. *Rezhym podzemnykh vod [Groundwater regime]*. Moscow – Leningrad, Publ. Stroitel'naya literatura, 1938. 192 p. (In Russian).
- King Fr. *Observations and experiments on the fluctuations in the level and rate of movement of ground water on the Wisconsin agricultural experiment station farm and at Whitewater, Wisconsin*. US Department of agriculture weather bureau, Bulletin №5, Washington DC, Weather Bureau, 1892. 92 p.
- Lavrov S.A., Markov M.L. Otsenka vliyaniya atmosfornogo davleniya na uroven' i stok gruntovykh vod [Assessment of the effect of atmospheric pressure on the level and ground waters flow]. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey]*, 2018, vol. 12, iss. 11–12, pp. 44–51. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51](https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51).
- Marunich S.V., Zavilejsky S.V., Livanova N.A. Vliyaniye izmeneniya atmosfornogo davleniya na formirovaniye rechnogo stoka [Influence of changes in atmospheric pressure on the formation of river runoff]. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya geograficheskaya [Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya]*, 1998, iss. 1, pp. 111–115. (In Russian).
- Quilty E.G., Roeloffs E.A. Removal of barometric pressure response from water level data. *Journal of Geophysical Research*, 1991, vol. 96, iss. B6, pp. 10209–10218. DOI: [10.1029/91JB00429](https://doi.org/10.1029/91JB00429).
- Rasmussen T.C., Crawford L.A. Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers. *Ground Water*,

Geophysical Research. 1991. Vol. 96. Iss. B6. Pp. 10209–10218. DOI: [10.1029/91JB00429](https://doi.org/10.1029/91JB00429).

Rasmussen T.C., Crawford L.A. Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers // *Ground Water*. 1997. Vol. 35. Iss. 3. Pp. 502–511. DOI: [10.1111/j.1745-6584.1997.tb00111.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00111.x).

Spane F.A. Considering barometric pressure in groundwater flow investigations // *Water Resources Research*. 2002. Vol. 38. Iss. 6. Pp. 14-1–14-18. DOI: [10.1029/2001WR000701](https://doi.org/10.1029/2001WR000701).

Turk L.J. Diurnal fluctuations of water tables induced by atmospheric pressure changes // *Journal of Hydrology*. 1975. Vol. 26. Iss. 1–2. Pp. 1–16. DOI: [10.1016/0022-1694\(75\)90121-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(75)90121-3).

Zhuravin S.A., Markov M.L. Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks // *Proceedings of the Workshop «Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins»* (Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March – 2 April 2009). IAHS Publ., 2010. No. 336. Pp. 219–224.

1997, vol. 35, iss. 3, pp. 502–511. DOI: [10.1111/j.1745-6584.1997.tb00111.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00111.x).

Sokolov B.L., Zavilejsky S.V., Marunich S.V. Eksperimental'nyye issledovaniya protsessov formirovaniya rechnogo stoka malykh vodosborov [Experimental studies of the processes of formation of river runoff in small catchments]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology (Russian)]*, 1994, iss. 10, pp. 82–91. (In Russian).

Spane F.A. Considering barometric pressure in groundwater flow investigations. *Water Resources Research*, 2002, vol. 38, iss. 6, pp. 14-1–14-18. DOI: [10.1029/2001WR000701](https://doi.org/10.1029/2001WR000701).

Tregubov O.D., Gartsman B.I., Shamov V.V., Lebedeva L.S., Tarbeeva A.M. Reaktsiya stoka malykh rek i nadmerzlotnykh vod Anadyrskoi nizmennosti na perepady atmosfernogo davleniya [Response of streams and Suprapermafrost waters of the Anadyr lowland to atmospheric pressure drop]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2021, vol. 3, iss. 3, pp. 297–309 (In Russian; abstract in English). DOI: [10.34753/HS.2021.3.3.297](https://doi.org/10.34753/HS.2021.3.3.297).

Turk L.J. Diurnal fluctuation of water tables induced by atmospheric pressure changes. *Journal of Hydrology*, 1975, vol. 26, iss. 1–2, pp. 1–16. DOI: [10.1016/0022-1694\(75\)90121-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(75)90121-3).

Zhuravin S.A., Markov M.L. Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks. *Proceedings of the Workshop «Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins»* (Goslar-Hahnenklee, Germany, March 30 –April 2, 2009). IAHS Publ., 2010, no. 336, pp. 219–224.