

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ
SCIENTIFIC DISCUSSIONS

УДК 556.51:551.34+911.9(571.651)

DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.297

РЕАКЦИЯ СТОКА МАЛЫХ РЕК И
НАДМЕРЗЛОТНЫХ ВОД
АНАДЫРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ
НА ПЕРЕПАДЫ
АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯО.Д. Трегубов¹, Б.И. Гарцман^{2,3},
В.В. Шамов^{3,4}, Л.С. Лебедева⁴,
А.М. Тарбеева⁵

¹Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан, Россия; ²Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; ³Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия; ⁴Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия; ⁵Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

gartsman@inbox.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования источников питания и суточного режима стока рек и ручьев Анадырской низменности в меженный период 2019 года. На примере полевых материалов рассмотрена проблема воздействия скачков атмосферного давления на водно-физические свойства торфяных почв и режим стока малых рек низменностей криолитозоны. Установлено, что суточный перепад атмосферного давления амплитудой 1,2 кПа в районе реки Угольная-Дионисия, расположенной в границах Анадырской низменности на Чукотке, привел к синхронному понижению, а затем повышению уровня надмерзлотных подземных и поверхностных речных вод в бассейне реки на 2,5–7,8 см. Описаны водно-физические свойства торфяных почв, предложен механизм воздействия атмосферного давления на влагоемкость тундровых почв и сток малых рек в фазу летней межени. Рассмотрены

RESPONSE OF STREAMS AND
SUPRAPERMAFROST WATERS OF
THE ANADYR LOWLAND TO
ATMOSPHERIC PRESSURE DROPOleg D. Tregubov¹, Boris I. Gartsman^{2,3},
Vladimir V. Shamov^{3,4}, Ludmila S. Lebedeva⁴,
Anna M. Tarbeeva⁵

¹North-Eastern Complex Research Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia; ²Institute for Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; ³Pacific Institute of Geography, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia; ⁴Melnikov Permafrost Institute, Siberian branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; ⁵Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

gartsman@inbox.ru

Abstract. The article presents the results of a study of water supply sources and the daily flow regime of rivers and streams of the Anadyr lowland in the low-water period of 2019. Regarding the field materials, the problem of the impact of atmospheric pressure surges on the water-physical properties of peat soils and the runoff regime of small rivers in the cryolithozone lowlands is considered. It was found that the daily atmospheric pressure drop with an amplitude of 1.2 kPa in the Ugolnaya-Dionisiya River watershed, located within the Anadyr Lowland in Chukotka, led to a synchronous decrease and then an increase in the level of suprapermafrost and river waters by 2.5–7.8 cm. The water-physical properties of peat soils are described, the mechanism of the influence of atmospheric pressure on the tundra soils moisture capacity and the small rivers runoff during the summer dry season is proposed. The geocryological, hydrogeological and hydrological conditions necessary for the manifestation of discovered effect are considered.

геокриологические, гидрогеологические и гидрологические условия необходимые для проявления обнаруженного эффекта воздействия скачков атмосферного давления на речной сток. Известные механические свойства торфяного покрова тундр и водно-физические свойства органогенного горизонта тундровых почв позволили предложить гипотезу воздействия атмосферного давления на уровень надмерзлотных вод посредством изменения влагоемкости торфа при его пластично-упругой деформации. Условием положительной реакции надмерзлотного и речного стока на скачки атмосферного давления являются: контактное с торфяным горизонтом почв залегание зеркала подземных вод; неполная влагоемкость органогенного горизонта почв; преимущественное питание реки надмерзлотными водами и наличие разветвленной дренажной сети. Представляется перспективным дальнейшее изучение атмосферных барических эффектов в подземных и поверхностных водах низменностей криолитозоны, а также в болотных ландшафтах более южных широт, где имеются условия для их проявления. В ландшафтных условиях Анадырской низменности при отсутствии атмосферных осадков барические скачки уровня надмерзлотных вод могут рассматриваться как механизм дополнительной подпитки влагой корнеобитаемого слоя почв в период активной вегетации тундровой растительности.

Ключевые слова: криолитозона; надмерзлотные воды; речной сток; колебания атмосферного давления; барический эффект; Анадырская низменность.

Введение

Явления изменения уровня подземных и поверхностных вод в результате естественных флуктуаций внешнего давления достаточно давно упоминаются как в российской [Каменский и др., 1938; Зырянов, Хублярян, 2006; Фомин, 2016; Штенгелов, Филимонова, Шубин, 2017; и другие], так и в мировой научной литературе

The known mechanical properties of the tundra peat cover and the water-physical properties of the organogenic horizon of tundra soils made allow to propose a hypothesis of the effect of atmospheric pressure on the level of suprapermafrost waters by changing the moisture capacity of peat during its plastic-elastic deformation. The condition for a positive reaction of suprapermafrost and river runoff to fluctuations in atmospheric pressure are: the bedding of the groundwater table in contact with the peat horizon; incomplete moisture capacity of the organogenic soil horizon; predominant feeding of the river by suprapermafrost waters and the presence of an extensive drainage network. It seems promising to further study the atmospheric baric effects of baroeffects in the underground and surface waters of the lowlands of the permafrost zone, as well as in the bog landscapes of more southern latitudes, where there are conditions for their manifestation. In the landscape conditions of the Anadyr Lowland, in the absence of atmospheric precipitation, pressure jumps in the level of suprapermafrost waters can be considered as a mechanism for additional moisture replenishment of the root layer of soils during the period of active vegetation of tundra vegetation.

Keywords: permafrost zone; suprapermafrost waters; river runoff; atmospheric pressure fluctuations; baroeffect; Anadyr lowland.

[Hylckama, 1968; Turk, 1975; Salama, Bartle, Farrington, 1994; Moraetis et al., 2010; и другие]. Например, в работе [Штенгелов, Филимонова, Шубин, 2017] было рассмотрено воздействие перепадов атмосферного давления на крупные артезианские бассейны – барические эффекты (далее – бароэффекты). Фомин Ю.Ф. [Фомин, 2016] изучал влияние приливов и ветровых нагонов на колебания уровней подземных и

поверхностных вод в прибрежной зоне, так называемый пампинг-эффект. Различные аспекты влияния атмосферного давления на речной сток и дебит родников рассматриваются в относительно недавних публикациях [Соколов, Завилейский, Марунич, 1994; Марунич, Завилейский, Ливанова, 1998; Zhuravin, Markov, 2010; Лавров, Марков, 2018]. Несмотря на довольно давнюю известность указанного явления, его нельзя считать хорошо изученным. Научные публикации, отражающие специальные исследования данного явления, крайне немногочисленны. Представления о различных проявлениях барофффектов пока не включены в концептуальный базис теории речного стока, что проявляется в практическом отсутствии математических моделей речного стока, отражающих данный аспект гидрологического режима.

Т.Е.А. Хилкама [Hylckama, 1968] на основе измерений в Аризоне установил тесную связь между внутрисуточными изменениями уровня грунтовых вод и атмосферным давлением воздуха. Л. Тюрк [Turk, 1975], исследуя внутрисуточную динамику уровня грунтовых вод в регионе Бонневиль, штат Юта, в качестве ее наиболее вероятной причины назвал вариации давления воздуха. Р.Б. Салама с соавторами [Salama, Bartle, Farrington, 1994] также сообщил о разнонаправленных внутрисуточных изменениях уровней подземных вод и давления воздуха на исследовательском полигоне в Австралии. Л.К. Лаутц [Lautz, 2008], проанализировав внутрисуточные колебания уровня грунтовых вод в пойменной области Ред-Каньон-Крик, штат Вайоминг, называет динамику давления и температуры воздуха возможными причинами суточного ритма помимо транспирации. Д. Мораетис с соавторами [Moraetis et al., 2010] обнаружили связь уровня подземных вод карстового массива на Крите в Греции с атмосферным давлением.

В данной статье представлены результаты исследования источников питания и суточного режима стока рек и ручьев Анадырской

низменности в межлетний период 2019 года. В ходе полевых наблюдений было обнаружено воздействие на сток реки Угольная-Дионисия перепада атмосферного давления амплитудой 1,2 кПа. По результатам полевых экспериментов были установлены возможные механизмы и условия реализации влияния атмосферного давления на сток тундровых рек. Обсуждается роль и значимость обнаруженного воздействия атмосферного давления на надмерзлотный водоносный горизонт и сток малых рек в области распространения тундровых и болотных почв криолитозоны.

Природные условия

Анадырская низменность представляет собой равнину с отметками высот от 2 до 150 м, расчлененную и обрамленную по краям горными сооружениями, обособленными горными поднятиями в виде кряжей и хребтов. Реки низменности отличаются весенним половодьем, прерывистым летне-осенним паводком и устойчивой зимней меженью. Питание рек преимущественно атмосферное, слой стока по данным многолетних наблюдений составляет порядка 250 мм. Климат на большей части описываемой территории – субарктический морской. Среднегодовая температура по данным метеостанции Анадырь¹ за период с 1981 по 2010 год составила -5°C . Осадков выпадает 382 мм в год, из них большая часть в зимний период. За период с 1976 по 2016 год среднегодовая температура воздуха повысилась на $2,2^{\circ}\text{C}$, годовое количество осадков увеличилось на 66 мм.

Мощность сплошной многолетней мерзлоты с севера на юг уменьшается от 300 до 50 м, в южных районах территории она становится прерывистой. Температура мерзлых грунтов уменьшается с севера на юг от $-7,1$ до $-1,0^{\circ}\text{C}$. Глубина сезонного протаивания изменяется от 0,45–0,6 м на пологих склонах тундровых увалов до 0,6–1,5 м на склонах крутизной более 3° и в поймах рек. В период с 1994 по 2019 год глубина сезонного протаивания

¹ Здесь и далее информация по климату с сайта Гидрометцентра России. <https://meteoinfo.ru/forecasts/russia/chukotskij-ar/anadyr>

в автономных ландшафтах возросла на 15 см или 36% от начального значения, в днище озерно-болотных котловин увеличение составило 34%, на склонах и в подножье тундровых увалов – 27% [Трегубов, Уяганский, Нутевекет, 2020]. В пределах низменности наибольшее распространение имеют тундровые глеевые и оглеянные торфянистые и торфяные почвы. Надмерзлотный водоносный горизонт образуется в первую декаду июня и существует до полного промерзания деятельного слоя поздней осенью. Мощность (0–45 см) и глубина залегания надмерзлотного водоносного слоя (0–120 см) изменяются в зависимости от ландшафта и глубины сезонного протаивания в течение теплого периода года.

Объекты и методы исследований

Объекты наблюдений и экспериментов расположены в бассейне реки Угольная-Дионисия, площадью 96 км² (рисунок 1). Река находится на восточных границах Анадырской низменности в 15 км к западу от города Анадыря. Протяженность реки 24 км. Отметки высоты уреза воды – от 100 и 180 м в истоках до 2,5 м в устье, которое расположено на правом берегу Анадырского лимана. Наблюдения за речным стоком проводились в 6 км от устья и в истоках реки на ручье Ягодный. В бассейне ручья Ягодный на пологом склоне тундрового увала в двух шурфах глубиной 35 см измерялся уровень воды. Параметры стока реки и уровня надмерзлотных вод изучались с 29 июня по 10 июля 2019 года. Среднесуточная температура во время полевых работ составила 12,1°C. Сплошной снежный покров в бассейне реки, как и в Анадырской низменности в целом, сошел за 2 недели до начала наблюдений. После схода снежного покрова до начала работ выпало 2,2 мм осадков, за время полевых наблюдений – 1,5 мм. По данным метеостанции Анадырь средняя температура за 4 месяца теплого периода 2019 года составила 10,1°C. При этом выпало 95,6 мм

осадков. Метеорологические условия в 2019 году, по данным многолетних наблюдений на метеостанции Анадырь, в целом близки к норме.

Измерения расхода реки Угольная-Дионисия на опорном створе производились с частотой 4 раза в сутки. Автоматизированные измерения уровня воды в шурфах и водотоках на створах, температуры почв и воды производились с интервалом 30 минут. При производстве измерений использовались следующие приборы и оборудование: приборы записи скорости течения «ПОТОК-мкр ГР-100» и «ПОТОК ГР21М»; автоматические логгеры производства фирмы НОВО Onset – измерители уровней «U20L-04» температуры «U23-003». Первичная обработка данных проводилась согласно рекомендациям производителей приборов. В обработке данных режимных наблюдений использовались инструменты Microsoft Excel.

Результаты исследований и их обсуждение

За время наблюдений глубина протаивания доминирующих в бассейне торфянистых почв увеличилась с 20–25 до 30–35 см. Торфяные почвы протаяли на 6–8 см. Расход воды на опорном створе уменьшился с 709 до 145 л/с (рисунок 2).

Автоматизированные измерения температуры, уровней воды в шурфах и водотоках, скорости течения реки Угольная-Дионисия показали субгармоничные суточные циклы значений параметров. Выявленные колебания уровней и температуры речных вод, температуры почв и воды находились в противофазе. Это позволило сделать вывод, что основным источником питания реки в отсутствие атмосферных осадков являются талые воды сезонных внутрпочвенных льдов, запасы которых в 30-сантиметровом верхнем слое почв оценены для тундровых ландшафтов бассейна в количестве 100–200 мм [Трегубов и др., 2020; Трегубов и др., 2021].

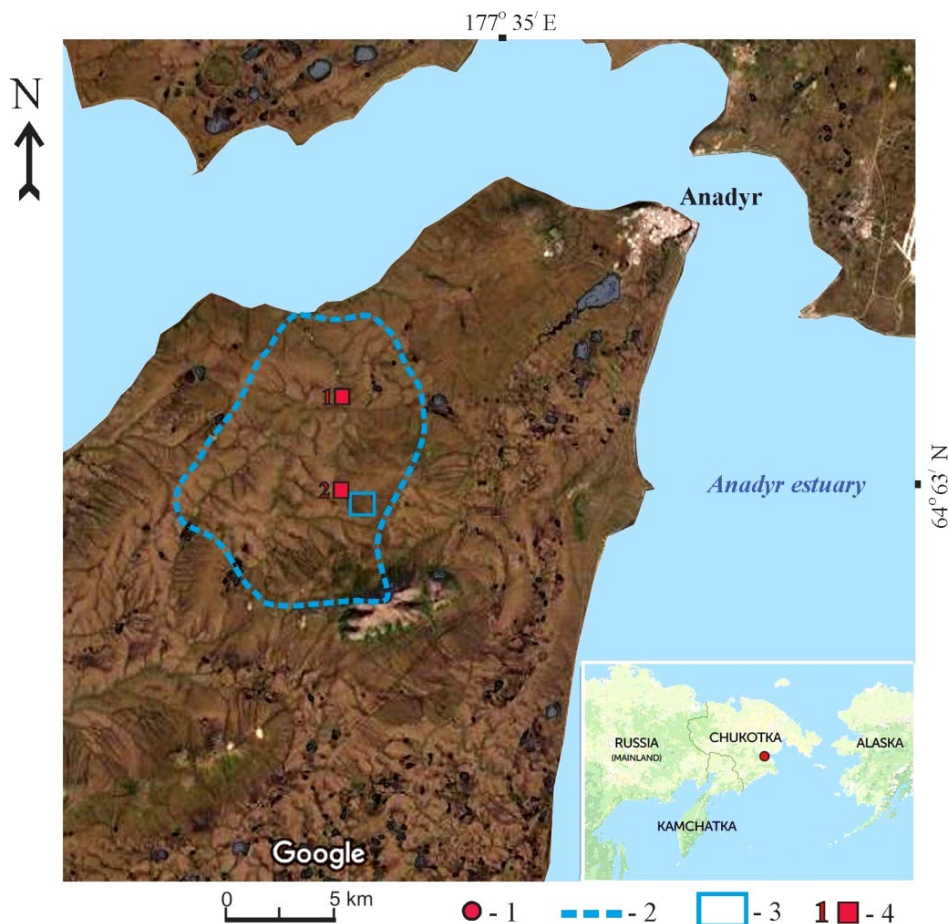


Рисунок 1. Район и объекты исследований: 1 – район работ на мелкомасштабной карте-врезке; 2 – граница бассейна реки Угольная-Дионисия; 3 – участок расположения шурфов; 4 – гидрологические створы на реке Угольная-Дионисия (1) и ручье Ягодный (2).

Figure 1. Area and objects of research: 1 – area of work on the inset map; 2 – border of the Ugolnaya-Dionisia river basin; 3 – area of the location of the pits; 4 – hydrological sections on the river Ugolnaya-Dionisia (1) and Yagodny creek (2).

В ходе первичной обработки данных автоматизированных измерений было обнаружено нарушение амплитуды суточных колебаний значений уровня воды в период с 2 по 5 июля 2019 года. С небольшой разницей во времени нарушения суточных циклов были зафиксированы на всех измерителях уровня воды в шурфах и водотоках. Это исключало техническую неисправность аппаратуры. При этом каких-либо значимых отклонений суточных циклов температуры воды и почв выявлено не было. Прибор записи скорости течения («ПОТОК ГР21М») прервал непрерывные измерения в 23:00 и был вновь запущен 04.07.2019 (рисунок 3). С учетом технических особенностей устройства можно предположить, что прибор отключился, когда скорость воды упала до минимума (0,03 м/с)

и сохранялась такой в течение 5 минут, в результате чего лопасти вертушки прекратили вращение.

Фактически наблюдалось почти синхронное падение уровней в шурфах и в реке в целом на территории около 60 км², сопровождавшееся практически остановкой течения реки, так что даже отключилась вертушка, поставленная на непрерывную запись. При обсуждении причин зафиксированного нарушения режима стока реки было обращено внимание на резкое ухудшение погодных условий в период с 2 по 5 июля 2019 года, сопровождаемое туманом, низкой облачностью и падением атмосферного давления с 101 до 100,2 кПа, с последующим его ростом до 101,4 кПа (рисунок 4).

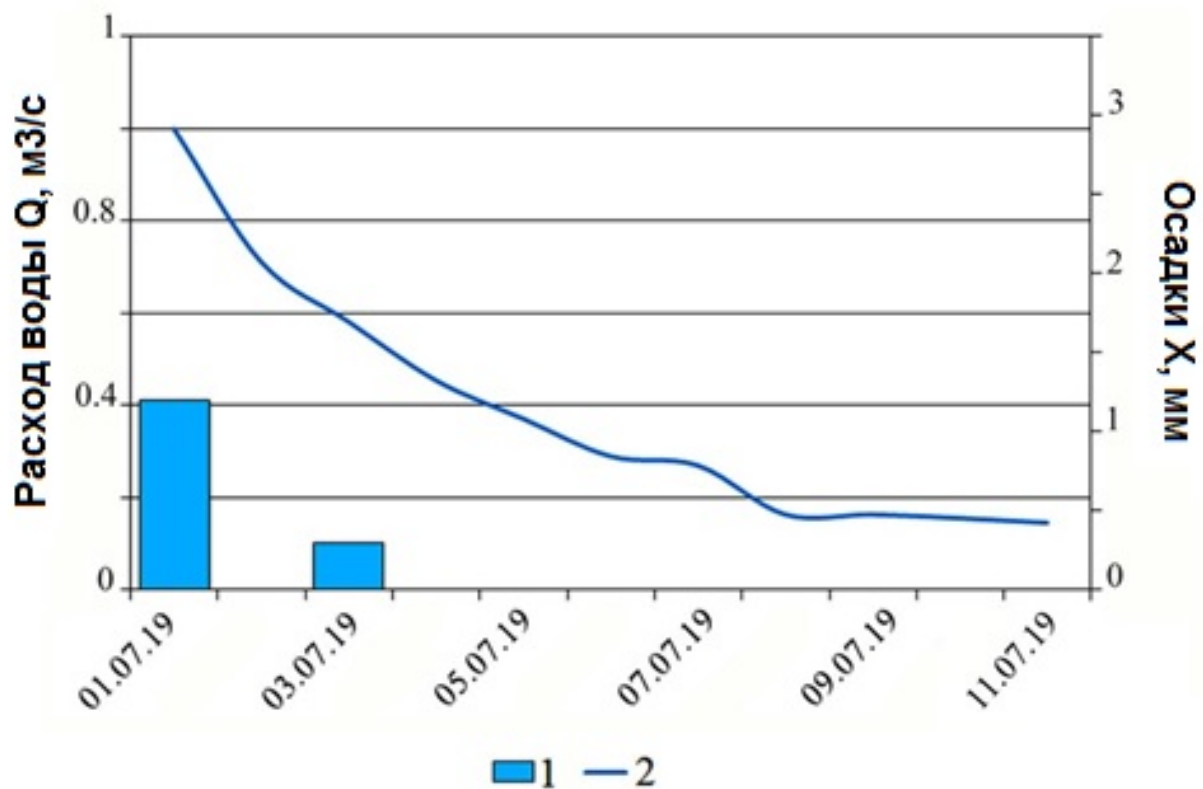


Рисунок 2. Атмосферные осадки (1) и динамика стока реки Угольная-Дионисия (2) в период наблюдений.

Figure 2. Atmospheric precipitation (1) and dynamics of the flow of Ugolnaya-Dionysia river (2) during the observation period.

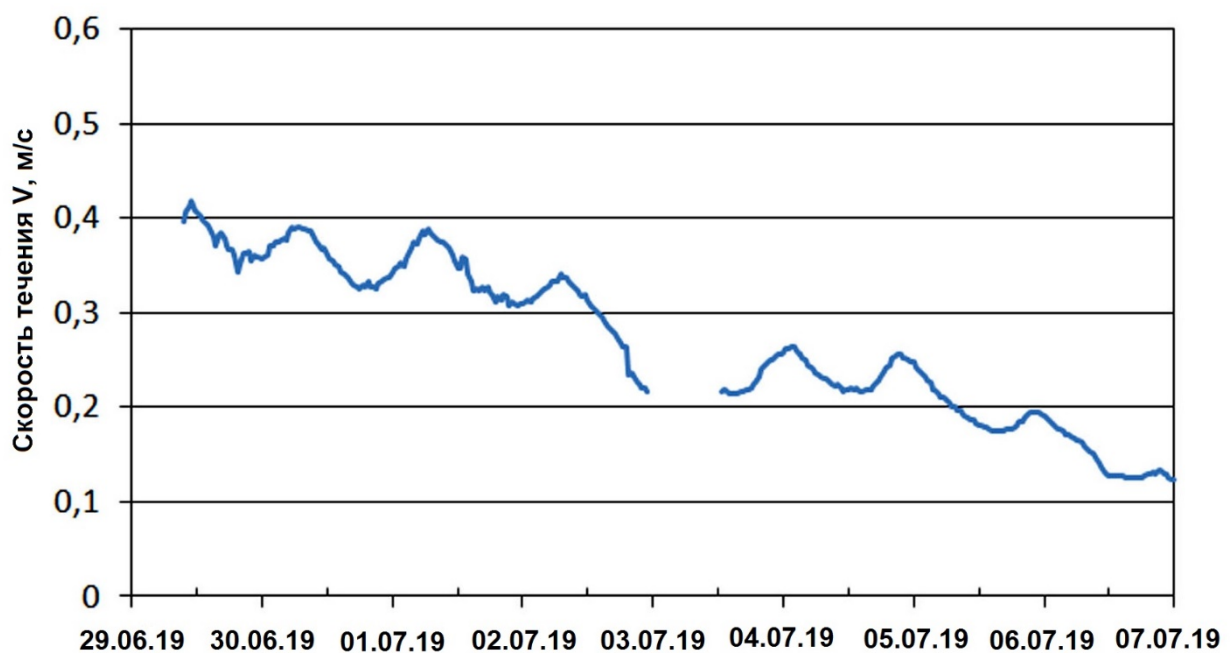


Рисунок 3. Суточная динамика скорости течения реки Угольная-Дионисия.

Figure 3. Daily dynamics of the flow velocity of Ugolnaya-Dionysia river.

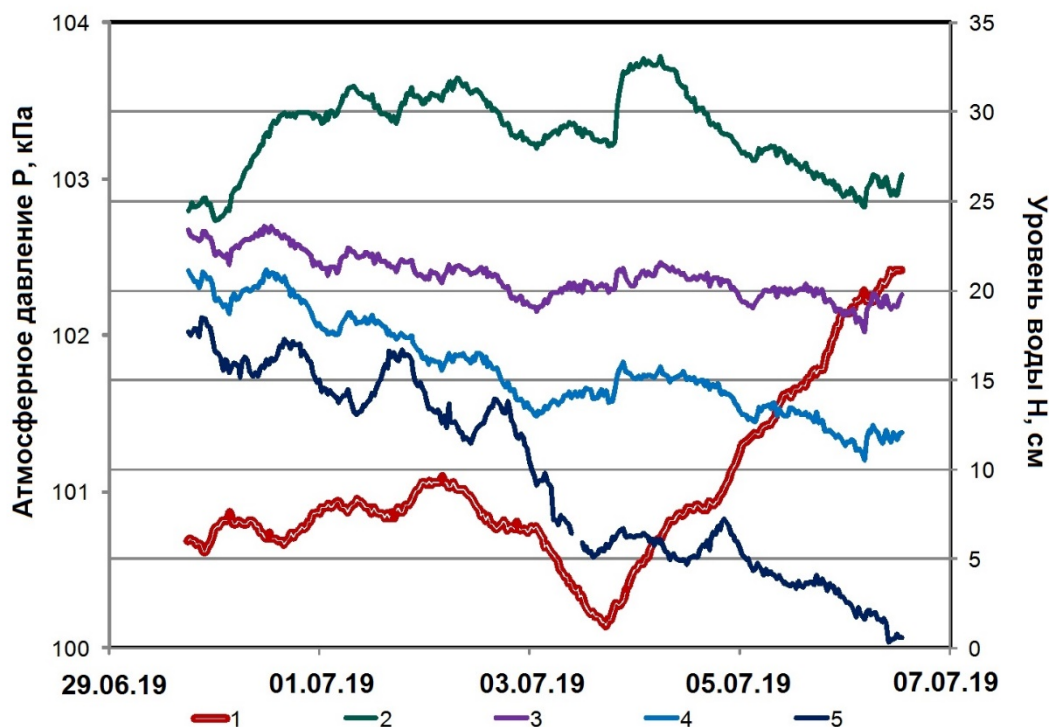


Рисунок 4. Динамика уровня надмерзлотных вод и поверхностных водотоков при изменении атмосферного давления: 1 – атмосферное давление; 2 – шурф в торфяной почве в борту склоновой ложбины; 3 – шурф в торфянистой почве в днище склоновой ложбины; 4 – уровень воды в ручье Ягодный; 5 – уровень воды в реке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

Figure 4. Dynamics of the level of suprapermafrost 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.

В период снижения атмосферного давления уровень воды в шурфах, в зависимости от их положения на склоне, упал на 2,5 и 4,4 см. После низкого стояния уровней в течение примерно суток произошел их довольно резкий компенсационный рост на 2,6 и 5,2 см. Перепад уровня воды (падение/подъем) в ручье Ягодный составил 3,5 и 3 см, в реке Угольная-Дионисия – 7,8 и 2 см. В качестве рабочей была принята гипотеза воздействия давления атмосферы (*барического эффекта*) 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 тальными водами, приводит к скачку надмерзлотного и восстановлению речного стока. Описываемый механизм соответствует наблюдаемой динамике уровня воды в шурфах и водотоках.

В частности подтверждением принятого объяснения механизма бароэффекта являются некоторые особенности его проявления. Как видно на рисунке 4, наиболее отчетливо аномалия записи уровней выражена в шурфе в торфяной почве, расположенном в борту склоновой ложбины. Остальные наблюдения, привязанные к элементам дренажной сети (ложбина – ручей – река), демонстрируют различную степень затухивания и трансформации этой аномалии. При этом наблюдается сдвиг аномалии по времени в различных точках бассейна, что

естественно объяснить влиянием добегающего стока по дренажной сети.

Расчет скользящих коэффициентов корреляции хода уровней в замыкающем створе и в вышележащих точках позволил оценить величины сдвига по времени, соответствующих максимумам корреляции, то есть оценить времена добегающего стока. Для створа на ручье Ягодном добегающий сток до замыкающего створа на реке Угольная-Дионисия оценено в 10 часов, для шурфа в днище ложбины – 12,5 часов, для шурфа на борту ложбины – 17 часов. Таким образом, наблюдения соответствуют картине гидрологического события, формирующегося «в точке» (почвенном профиле), но происходящем синхронно на всей площади водосбора. На бассейновом уровне оно проявляется в соответствии с закономерностями добегающего стока до замыкающего створа.

Достаточно ли амплитуды колебаний атмосферного давления для изменения водно-физических свойств тундровых почв и каким образом изменение внешнего давления может увеличить или уменьшить их влагоемкость? По результатам компрессионных испытаний известно, что предел внешней нагрузки, до которого поверхностный торф сохраняет пластично-упругие свойства, равен 15 кПа. Уплотнение и остаточные деформации торфяного грунта фиксируются только при внешнем давлении 200 кПа и более. Данные показатели используются при определении допустимых нагрузок транспортных средств на тундровый покров и в дорожном строительстве [Иванов, 1975; Амарян, 1990; Ермичев и др., 2006]. Предельная величина упругости сопоставима с фиксируемыми метеорологами перепадами атмосферного давления при циклонической погоде (8 кПа) и в 500 раз больше суточных колебаний давления в высоких широтах (0,03 кПа). Это означает, что поверхностный торфяной покров пластичен, то есть восприимчив к внешнему даже незначительному давлению и проявляет упругие свойства в границах суточных и непериодических колебаний атмосферного давления – восстанавливает форму и объем после снятия нагрузки. Пористость (порозность)

торфяных почв высока и достигает 90%. Уменьшение атмосферного давления по существу означает снятие внешнего давления, которое приведет к изменению баланса сил между внешней нагрузкой и упругостью торфяного покрова. В результате за счет компенсационного подъема поверхности объем торфяных горизонтов почв увеличится, что приведет к увеличению размеров макропор и образованию новых капилляров. Количество захваченной и удерживаемой почвой влаги при условии близкого поверхностного залегания подземных вод увеличится. При повышении атмосферного давления будет наблюдаться обратный процесс: с уменьшением эффективной пористости связанная вода большей частью перейдет в состояние свободной. Несмотря на множество сделанных допущений, описанная модель представляется вполне реалистичной.

Рассмотрим возможные естественные ограничения проявления бароэффекта. В первую очередь обязательно распространение на значительной площади торфяного горизонта почв и залегание на его подошве зеркала подземных вод. Второе условие касается неполного насыщения влагой верхних органогенных горизонтов почвы (нереализованная влагоемкость) в условиях незначительных осадков или их отсутствия. Именно такие условия сложились в бассейне реки Угольная-Дионисия в первой декаде июля 2019 года при протаивании деятельного слоя на глубину 20–30 см и выпадению 3,7 мм осадков. Для проявления бароэффекта в режиме стока малых рек низменностей криолитозоны действует третье условие – наличие разветвленной дренажной сети на склонах тундровых увалов, верховых и низинных болот. При ее отсутствии бароэффект вероятно будет проявляться только через подъем и понижения зеркала подземных вод и уровня воды на болотах.

Необходимо отметить, что отмеченный эффект находится в противоречии с приводимыми в литературе описаниями бароэффекта, которые проявляются в росте уровней грунтовых вод и увеличении дебитов родников при возрастании атмосферного

давления и, наоборот, в их снижении при падении давления. Приводятся даже сведения о прохождении паводков на малых реках, не связанных с выпадением существенных осадков на водосборах [Каменский и др., 1938; Лавров, Марков, 2018; и другие]. Объяснения этого эффекта основывается в целом на признании существенной изоляции воздуха, заключенного в зоне аэрации, от свободной атмосферы, что вызывает различные изменения напоров в зоне аэрации, на зеркале грунтовых вод и на поверхности свободных потоков. Как и сам эффект, этот физический механизм существенно отличается от развиваемой нами концепции.

Как представляется, сложность и разнообразие строения почвенно-грунтового профиля зоны активного водообмена в различных регионах и условиях вполне способно порождать столь же сложные и разнообразные гидрофизические и гидрологические эффекты, связанные с различными механизмами влияния атмосферного давления на речной сток. Данная тематика заслуживает расширения специальных его исследований, включающих натурные наблюдения, лабораторные эксперименты и развитие физико-математических моделей стока. С точки зрения экологии тундровых и болотных ландшафтов в целом, реализация описанного бароэффекта обеспечивает дополнительное увлажнение корнеобитаемого слоя почв в условиях недостатка атмосферных осадков, снижает риск возникновения тундровых и торфяных пожаров. Каковы возможные следствия колебаний речного стока, связанных с перепадами атмосферного давления для пресноводных экосистем, непонятно. Следует заметить, что зафиксированный полевым экспериментом бароэффект на опорном створе реки Угольная-Дионисия привел к уменьшению в течение получаса скорости течения с 0,25 до 0,05 м/с.

Выводы

1. В ходе наблюдений суточного режима надмерзлотных подземных и поверхностных речных вод в бассейне реки Угольная-Дионисия (Анадырская низменность, Чукотка)

зафиксирована существенная реакция уровней воды на перепад атмосферного давления. Одновременно с понижением давления на 0,8 кПа, а затем его повышением на 1,2 кПа произошло падение, а затем рост, уровней надмерзлотных вод примерно на 3–5 см и речных – на 2–7 см. В целом отмеченное проявление прямой связи уровней грунтовых вод и малых рек с атмосферным давлением не совпадает с преимущественно отмечаемыми в гидрогеологической литературе фактами обратной связи тех же показателей. В области же речной гидрологии данным связям практически не уделяется внимания, вопрос о роли атмосферного давления в формировании речного стока следует признать совсем не проработанным.

2. Известные механические свойства торфяного покрова тундр и водно-физические свойства органогенного горизонта тундровых почв позволили предложить гипотезу воздействия атмосферного давления на уровень надмерзлотных вод посредством изменения влагоемкости торфа при его пластично-упругой деформации. Условием положительной реакции надмерзлотного и речного стока на скачки атмосферного давления являются: контактное с торфяным горизонтом почв залегание зеркала подземных вод; неполная влагоемкость органогенного горизонта почв; преимущественное питание реки надмерзлотными водами и наличие разветвленной дренажной сети.

3. Представляется перспективным дальнейшее изучение атмосферных бароэффектов в подземных и поверхностных водах низменностей криолитозоны, а также в болотных ландшафтах более южных широт, где имеются условия для их проявления. В ландшафтных условиях Анадырской низменности при отсутствии атмосферных осадков барические скачки уровня надмерзлотных вод могут рассматриваться как механизм дополнительной подпитки влагой корнеобитаемого слоя почв в период активной вегетации тундровой растительности.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-05-60036, а также в рамках темы

Литература

- Амарян Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. М.: Недра, 1990. 219 с.
- Ермичев В.А., Лобанов В.Н., Кривченкова Г.Н., Артемов А.В. Прогнозирование осадки и плотности лесных почв после проезда гусеничных машин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2006. № 2. С. 48–51.
- Зырянов В.Н., Хубларян М.Г. Пампинг-эффект в теории нелинейных процессов типа уравнения теплопроводности и его приложение в геофизике // Доклады академии наук. 2006. Т. 408. № 4. С. 535–538.
- Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.
- 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. 12. № 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., Лебедева Л.С., Нутевекет М.А., Тарбеева А.М., Уяганский К.К., Шекман Е.А., Шепелев В.В. Ландшафтно-мерзлотные условия и факторы формирования летнего стока малых рек приморской низменности криолитозоны // Сборник докладов международной научной конференции памяти

№0147-2019-0001 Государственного задания ИВП РАН.

References

- Amaryan L.S. *Svoistva slabых gruntov i metody ikh izucheniya [Properties of Soft Soils and Methods for Their Studying]*. Moscow, Publ. Nedra, 1990. 220 p. (In Russian).
- Ermichev V.A., Lobanov V.N., Krivchenkova G.N., Artemov A.V. Prognozirovaniye osadki i plotnosti lesnykh pochv posle proyezda gusenichnykh mashin [Forecasting of forest soil settlement and density after tracked machines pass]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2006, iss. 2, pp. 48–51. (In Russian).
- Fomin Yu.V. Priroda pamping-effekta v pribrezhnoy zone [Nature of the pumping-effect in the coastal zone]. *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]*, 2016, vol. 361. pp. 203–230. (In Russian; abstract in English).
- Hylckama T.E.A.V. Water level fluctuations in evapotranspirometers. *Water Resources Research*, 1968, vol. 4, iss. 4, pp. 761–768. DOI: [10.1029/WR004i004p00761](https://doi.org/10.1029/WR004i004p00761).
- Ivanov K.E. *Vodoobmen v bolotnykh landshaftakh [Water movements in mirelands]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1975. 280 p. (In Russian; abstract in English).
- Kamensky G.N., Bindeman N.N., Vevirovskaya M.A., Altovsky M.E. *Rezhym podzemnykh vod [Groundwater regime]*. Moscow – Leningrad, Publ. Stroitel'naya literatura, 1938. 192 p. (In Russian).
- Lautz L.K. Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in semi-arid riparian zone. *Hydrogeology Journal*, 2008, vol. 16, iss. 3, pp. 483–497. DOI: [10.1007/s10040-007-0239-0](https://doi.org/10.1007/s10040-007-0239-0).
- Lavrov S.A., Markov M.L. Otsenka vliyaniya atmosfernogo davleniya na uroven' i stok

выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению» (г. Санкт-Петербург, 23–31 октября 2020 года). СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 805–810.

Трегубов О.Д., Гарцман Б.И., Тарбеева А.М., Лебедева Л.С., Шепелев В.В. Пространственная и временная динамика источников питания и водного режима рек Анадырской низменности // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 4. С. 427–438. DOI: [10.31857/S0321059621040180](https://doi.org/10.31857/S0321059621040180).

Трегубов О.Д., Уяганский К.К., Нутевекет М.А. Мониторинг мерзлотно-климатических условий Анадырской низменности // География и природные ресурсы. 2020. № 2 (161). С. 143–152. DOI: [10.21782/GiPR0206-1619-2020-2\(143-152\)](https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2020-2(143-152)).

Фомин Ю.В. Природа пампинг-эффекта в прибрежной зоне // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. Вып. 361. С. 203–230.

Штенгелов Р.С., Филимонова Е.А., Шубин И.С. Обработка откачки из напорного водоносного горизонта при переменном дебите и атмосферном давлении // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2017. № 3. С. 50–58. DOI: [10.33623/0579-9406-2017-3-50-58](https://doi.org/10.33623/0579-9406-2017-3-50-58).

Hylckama T.E.A.V. Water level fluctuations in evapotranspirometers // Water Resources Research. 1968. Vol. 4. Iss. 4. Pp. 761–768. DOI: [10.1029/WR004i004p00761](https://doi.org/10.1029/WR004i004p00761).

Lautz L.K. Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in semi-arid riparian zone // Hydrogeology Journal. 2008. Vol. 16. Iss. 3. Pp. 483–497. DOI: [10.1007/s10040-007-0239-0](https://doi.org/10.1007/s10040-007-0239-0).

Moraetis D., Efstathiou D., Stamati F., Tzoraki O., Nikolaidis N.P., Schnoor J.L., Vozinakis K. High-frequency monitoring for the identification of hydrological and bio-geochemical processes in a Mediterranean river basin // Journal of Hydrology. 2010. Vol. 389. Iss. 1-2. Pp. 127–136. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2010.05.037](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.037).

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).

Moraetis D., Efstathiou D., Stamati F., Tzoraki O., Nikolaidis N.P., Schnoor J.L., Vozinakis K. High-frequency monitoring for the identification of hydrological and bio-geochemical processes in a Mediterranean river basin. *Journal of Hydrology*, 2010, vol. 389, iss. 3–4, pp. 127–136. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2010.05.037](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.037).

Salama R.B., Bartle G.A., Farrington P. Water use of plantation Eucalyptus camaldulensis estimated by groundwater hydrograph separation techniques and heat pulse method. *Journal of Hydrology*, 1994, vol. 156, no. 1–4, pp. 163–180. DOI: [10.1016/0022-1694\(94\)90076-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90076-0).

Shtengelov R.S., Filimonova E.A., Shubin I.S. Analysis of multiwell pumping tests in a confined aquifer under variations in the production rate and atmospheric pressure. *Moscow University Geology Bulletin*, 2017, vol. 72, iss. 4, pp. 279–289. DOI: [10.3103/S0145875217040068](https://doi.org/10.3103/S0145875217040068). (Russ. ed.: Shtengelov R.S., Filimonova E.A., Shubin I.S. Obrabotka otkachki iz napornogo vodonosnogo gorizonta pri peremennom debite i atmosfornom davlenii. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 2017, iss.3, pp. 50–58. DOI: [10.33623/0579-9406-2017-3-50-58](https://doi.org/10.33623/0579-9406-2017-3-50-58)).

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).

Salama R.B., Bartle G.A., Farrington P. Water use of plantation *Eucalyptus camaldulensis* estimated by groundwater hydrograph separation techniques and heat pulse method // *Journal of Hydrology*. 1994. Vol. 156. Iss. 1–4. Pp. 163–180. DOI: [10.1016/0022-1694\(94\)90076-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90076-0).

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. P. 219–224.

Tregubov O., Gartsman B., Lebedeva L., Nuteveket M., Tarbeeva A., Uyagansky K., Shekman E., Shepelev V. Landscape-permafrost conditions and factors of summer runoff formation of small coastal lowland rivers. *E3S Web of Conferences. Fourth Vinogradov Conference «Hydrology: from Learning to Worldview» in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov (St. Petersburg, Russia, March 20–27, 2020)*, 2020, art. numb. 05015. DOI: [10.1051/e3sconf/202016305015](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305015). (Russ. ed.: Tregubov O.D., Gartsman B.I., Lebedeva L.S., Nuteveket M.A., Tarbeeva A.M., Uyaganskii K.K., Shekman E.A., Shepelev V.V. Landshaftno-merzlotnye usloviya i faktory formirovaniya letnego stoka malykh rek primorskoj nizmennosti kriolitozony. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova «Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Hidrologiya: ot poznaniya k mirovozzreniyu»* (g. Sankt-Peterburg, 23–31 oktyabrya 2020 goda). St. Petersburg, Publ. VVM, 2020, pp. 805–810).

Tregubov O.D., Gartsman B.I., Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Shepelev V.V. Spatial and temporal dynamics of sources and water regime of the Ugol'naya-Dionisiya river (Anadyr lowland, Chukotka). *Water Resources*, 2021, vol. 48, iss. 4, pp. 521–531. DOI: [10.1134/S0097807821040187](https://doi.org/10.1134/S0097807821040187). (Russ. ed.: Tregubov O.D., Gartsman B.I., Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Shepelev V.V. Prostranstvennaya i vremennaya dinamika istochnikov pitaniya i vodnogo rezhima rek Anadyrskoj nizmennosti. *Vodnye resursy*, 2021, vol. 48, iss. 4, pp. 427–438. DOI: [10.31857/S0321059621040180](https://doi.org/10.31857/S0321059621040180)).

Tregubov O.D., Uyagansky K.K., Nuteveket M.A. Monitoring merzlotno-klimaticheskikh usloviy Anadyrskoy nizmennosti [Monitoring of permafrost and climate conditions of the Anadyr lowland]. *Geografiya i prirodnyye resursy [Geography and natural resources]*, 2020, no. 2, pp. 143–152. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.21782/GiPR0206-1619-2020-2\(143-152\)](https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2020-2(143-152)).

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, 30 March – 2 April 2009)*. IAHS Publ., 2010, no. 336, pp. 219–224.

Zyryanov V.N., Khublaryan M.G. Pumping effect in the theory of nonlinear processes of the thermal conductivity equation type and its application in geophysics. *Doklady Earth Sciences*, 2006, vol. 408, iss. 4, pp. 674–677. DOI: [10.1134/S10283334X06040374](https://doi.org/10.1134/S10283334X06040374). (Russ. ed.: Zyryanov V.N., Khublaryan M.G. Pamping-effekt v teorii nelineinykh protsessov tipa uravneniya teploprovodnosti i ego prilozhenie v geofizike. *Doklady akademii nauk*, 2006, vol. 408, iss. 4, pp. 535–538).