



УДК 622.023.64:622.331

## ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОРФА И ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Мисников О.С.

Тверской государственный технический университет

### Аннотация.

Водно-физические свойства торфа являются определяющими при его добыче, комплексной переработке и рекультивации выработанных месторождений. Химический состав воды торфяного месторождения зависит от водно-минерального режима питания болота. Природные ионообменные свойства торфа дают возможность проводить очистку стоков без нанесения урона окружающей среде. Показатель полной влагоемкости торфа позволяет осуществлять прогнозирование процессов поглощения различных видов поллютантов на водной основе. Рассмотрено влияние на водно-физические свойства торфа анионов и катионов, растворенного органического вещества и поверхностно-активных веществ. Показаны варианты взаимного влияния на систему структурных характеристик сорбента (торфа) и состава сорбата (поглощаемого раствора).

### Информация о статье

Принята 14 апреля 2019 г.

**Ключевые слова:** торф, торфяное месторождение, свойства воды, химический состав воды, кислотность

## CHANGES IN WATER-PHYSICAL PROPERTIES OF PEAT AND PEAT DEPOSITS UNDER HUMAN IMPACT

Oleg S. Misnikov

Tver State Technical University

### Abstract.

Water-physical properties of peat determine its harvesting, complex processing and reclamation of depleted deposits. The chemical composition of water in peat deposits depends on the water-mineral regime of a peatland. The natural ion-exchange properties of peat make it possible to clean the wastewater without causing damage to the environment. The indicator of full moisture capacity of peat allows forecasting the processes of absorption of various types of water-based pollutants. The impact of anions, cations, dissolved organic matter and surfactants on water-physical properties of peat is considered. The options of mutual influence of the structural characteristics of the sorbent (peat) and the composition of the sorbate (absorbed solution) on the system are demonstrated.

### Article info

Received April 14, 2019

**Keywords:** peat, peat deposit, water properties, chemical composition of water, acidity

**Введение.** Поскольку образование, накопление и залегание торфа в течение многих тысячелетий генетически связано с водой, то его водно-физические свойства являются основными и определяющими во всех без исключения сферах торфяного производства: добыче, комплексной переработке и рекультивации выработанных месторождений. По большому счету именно вода количественно и качественно является определяющим фактором в экономической эффективности торфяного дела. Это относится как к торфяным месторождениям так и к природному органическому ресурсу, залегающему в них – торфу.

**Материалы и методы.** Физико-химические процессы, протекающие при обезвоживании торфяной залежи, очень сложны и приводят к существенному изменению свойств слагающего ее торфа и, соответственно, всего месторождения в целом. Это объясняется не только ее чрезвычайно большой обводненностью, но и тем, что значительное количество воды связано с «сухим»



веществом торфа. Управление водоудерживающей способностью торфа в залежи в процессе осушения (или обводнения), а также при сбросах и очистке различных видов стоков позволяет разработать конкретные показатели допустимого воздействия на болото, при которых будут сохраняться его основные функции [1, 2].

Дисперсионная среда торфяных залежей (торфяная вода) является раствором, состоящим из растворителя (низкомолекулярной жидкости – воды), растворенных компонентов (разнообразные органические и минеральные вещества). Компоненты торфа находятся в растворе в виде коллоидных частиц, молекулярных соединений и ионов [3]. Как правило, химический состав воды торфяного месторождения зависит от водно-минерального режима питания болота. На него влияют атмосферные осадки, поверхностный сток, грунтовые, речные, озерные и другие воды. Причем зачастую они резко отличаются между собой по концентрации и составу минеральных компонентов и содержанию растворенного органического вещества.

Если исключить сбросы поллютантов, то общая нативная минерализация торфяных вод уменьшается от низинных болот к верховым. Воды верховых болот характеризуются минерализацией  $(4...7) \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>. Переходные и низинные торфяники имеют более высокие значения:  $(7...18) \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup> – слои контактных зон переходного торфа и  $(18...29) \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup> – основная масса низинных торфяных залежей. Самые высокие показатели минерализации свойственны водам ольхового и тростникового торфа, которые содержат  $(1...7) \cdot 10^{-1}$  кг/м<sup>3</sup> зольных элементов. Вода притеррасных и надпойменных отложений достигает иногда аномальных значений ( $> 1$  кг/м<sup>3</sup>) с достаточно разнообразным катионным составом [3].

Катионный состав очень важен с точки зрения нормы и отклонений водно-физических (главным образом сорбционных) свойств болота в целом и торфа в частности, поскольку он обуславливает их способность к ионному обмену. Кроме того, он влияет на механизм и величину водонасыщения залежи и торфа. В том числе это относится и к осушенным месторождениям.

В минеральном комплексе торфяных залежей преобладают ионы кальция и его водорастворимые соединения. Степень насыщенности поглощающего комплекса торфа кальцием составляет для верховых до 0,2, переходных – 0,2...0,45, низинных – 0,45...0,70 и более. Катионы кальция являются в основном регуляторами биохимических процессов в торфяных залежах, сильными нейтрализаторами кислотности среды и определяют структуру их коллоидно-высокомолекулярной составляющей. Содержание катионов кальция в торфяных водах верховых болот не превышает  $1,5 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>, а низинных –  $(1,5...8,5) \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>. В тоже время в грунтовых водах оно изменяется в пределах  $(6...14) \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup> [4-6].

Если проанализировать содержание других основных ионов, то они в воде торфяных месторождений в убывающем ряду распределяются следующим образом [7].

Верховые болота:

катионы –  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{NH}_4^{+}$ ;

анионы –  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{HCO}_3^{-} > \text{NO}_3^{-} > \text{H}_2\text{PO}_4^{-}$ .

Переходные болота:

катионы –  $\text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+} > \text{NH}_4^{+}$ ;

анионы –  $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{NO}_3^{-} > \text{H}_2\text{PO}_4^{-}$ .

Низинные болота:

катионы –  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{NH}_4^{+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{K}^{+}$ ;

анионы –  $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{NO}_3^{-} > \text{H}_2\text{PO}_4^{-}$ .

В целом же химический состав вод неоднороден даже в пределах одного торфяного месторождения и во многом определяется географическим положением и геоморфологией заболоченных земель. Кроме того, он изменяется по глубине и во времени. Степень минерализации воды в торфяном месторождении сильно отличается от вод, поступающих и стекающих из него. Это связано, прежде всего, с природными ионообменными свойствами торфа. Как правило, ионный обмен в торфе протекает в кислой среде: pH воды верховых болот равен 3,6...5,6; а низинных – 4,7...7,3; переходных – 4,2...6,3 [4].

**Результаты и обсуждение.** При решении различных задач, связанных с обоснованием допустимых воздействий на объект, при котором обеспечивается сохранение его основных



функций, кроме катионного состава большое значение будет иметь и содержание растворенных органических веществ (РОВ). Во многих случаях именно они являются основными загрязнителями.

В водах низинных торфяных месторождений РОВ содержится значительно меньше по сравнению с верховыми. Это можно объяснить различием ионного комплекса (приведен выше), вызывающего коагулирующее действие. Например, в общей массе органических веществ воды (например,  $0,3 \dots 0,4 \text{ кг/м}^3$  в верховом магелланикум-торфе и  $0,2 \dots 0,3 \text{ кг/м}^3$  в низинном осоковом лесном) были обнаружены моносахариды, уроновые кислоты, аммиак, полимеры углеводов (пентозы), гуминовые кислоты, битумы, азотистые и другие соединения [6, 7].

Содержание минеральных и органических компонентов, а также показатель кислотности по глубине торфяных залежей распределяются неравномерно. В большинстве случаев повышенное содержание компонентов неорганической части отмечается в поверхностных и придонных слоях торфяных залежей, а также в прослойках торфа высокой степени разложения. Изменение кислотности довольно четко коррелирует с содержанием оксида кальция и количеством обменного кальция  $\text{Ca}^{2+}$  в торфяной воде, а также катионов  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  в поглощенном комплексе по глубине торфяной залежи и во времени [5].

Грунтовый поток, не одинаковый по величине в различных горизонтах залежи, существенно изменяет распределение обменных катионов по глубине, миграция воды в залежи приводит к вымыванию катионов. В результате этого меняется структура залежи, ее водные и другие свойства, в том числе водопроницаемость и фильтрационная способность [8].

Повышенные расходы грунтовых вод в верхних и нижних горизонтах низинной залежи связаны не только с особенностями геоботанического строения, но и с компактным агрегированием продуктов распада при их взаимодействии с обменными катионами.

Показатель полного влагонасыщения (полная влагоемкость) играет важную роль при оценке сорбционных свойств болота (торфяного месторождения), торфа, а также продуктов его переработки (например, сорбентов). При решении экологических задач это особенно важно при оценке количества сбрасываемых на месторождение загрязнителей (использование торфяного месторождения в качестве естественного фильтра).

В состоянии полной влагоемкости основная масса воды в торфе представлена механической и осмотической категориями влаги. Известно [6, 7], что содержание слабосвязанной воды определяется особенностями пористой структуры торфа, а также микросостоянием элементов структуры. Неразложившиеся остатки растений (например, мхи и травянистые растения) имеют разное строение тканей, вследствие чего могут поглощать и удерживать неодинаковое количество воды. Но в тоже время коллоидные и высокомолекулярные компоненты оказывают серьезное влияние на полную влагоемкость, поскольку они больше подвержены необратимым процессам, протекающим при сушке торфа [9].

Это также происходит и при осушении месторождения, особенно его верхнего слоя (зоны аэрации). Это является причиной, по которой для одного и того же вида торфа при разных значениях влажности полная влагоемкость неодинакова.

Таким образом, водно-физические свойства торфа определяются не только строением нативной структуры, но и составом, степенью разложения, дисперсностью, начальной влажностью, температурой и временем контакта с водой, а также рядом других факторов. Торф низкой степени разложения, в котором растительные остатки, пронизанные капиллярами разной формы и размеров, не утратили своего анатомического строения, отличается высокой влагоемкостью (до  $30 \dots 35 \text{ кг/кг}$ ). С увеличением степени разложения влагоемкость торфа уменьшается<sup>1</sup> (таблица 1).

Анализ представленных в таблице 1 данных показывает, что наибольшую влагоемкость при малой степени разложения имеют виды торфа моховой группы. При увеличении степени разложения полная влагоемкость снижается у всех видов торфа независимо от типа, что связано с уменьшением содержания в первую очередь капиллярной и внутриклеточной воды [10] в процессе гумификации.

<sup>1</sup> В таблице 1 приведены пределы изменения полной влагоемкости от меньшего к большему.





**Таблица 1.** Пределы изменения полной влагоемкости торфа [7]

Вид торфа	Степень разложения, $R_T$ , %	Полная влагоемкость, $W_{\Pi}$ , кг/кг
<b>Верховой торф</b>		
Комплексный	5...30	12,0...30,0
Сфагново-мочажинный	5...20	10,8...24,6
Магелланикум	5...35	11,2...26,3
Фускум	5...25	13,6...25,9
Шейхцериово-сфагновый	15...45	9,5...17,8
Шейхцериовый	25...45	10,1...16,4
Пушицевый	25...55	8,4...14,6
<b>Переходный торф</b>		
Сфагновый	5...30	13,6...19,5
Сфагново-осоковый	10...50	8,5...16,6
Шейхцериовый	20...50	8,1...18,7
Осоковый	20...45	8,9...15,6
Древесно-сфагновый	30...40	8,3...10,1
Древесно-осоковый	30...50	8,5...12,2
Древесный	30...50	7,8...12,5
<b>Низинный торф</b>		
Гипновый	15...30	7,8...15,1
Осоково-гипновый	15...40	8,0...18,1
Осоковый	15...45	7,9...17,8
Тростниковый	40...55	6,8...9,0
Древесно-тростниковый	25...55	7,0...14,2
Древесно-осоковый	25...55	6,5...14,8
Ольховый	35...45	6,4...9,5
Древесный	30...50	6,6...12,2

В пределах переходного и низинного типов торфа наибольшую влагоемкость имеет торф моховой и травяной групп. Однако полная влагоемкость у торфа низинного типа несколько меньше, чем у переходного, и еще ниже, чем у верхового. Полная влагоемкость торфа лесотопяного и лесного подтипов как по максимальным, так и по минимальным значениям ниже, чем у топяного подтипа. Минимальные значения  $W_{\Pi} = 6,4...6,6$  кг/кг получены для ольхового и древесного видов низинного торфа с  $R_T = 45...50$  %. Наблюдается, как правило, обратно пропорциональная зависимость между полной влагоемкостью и степенью разложения торфа.

У торфа верхового типа зольность ( $A^\circ$ ), изменяясь в небольшом интервале (2...6 %), слабо влияет на значение полной влагоемкости. Для торфа низинного типа характерно уменьшение  $W_{\Pi}$  с ростом зольности (от 3 до 20 %).

Количество поглощенной воды зависит также от вида торфа, слагающего торфяное месторождение. Сфагновый торф обладает наибольшей влагоемкостью, что позволяет прогнозировать высокую поглотительную способность, в том числе и по различным видам стоков, сбрасываемым в болото (например, при использовании болота как естественного фильтра-утилизатора загрязнений).

Кроме того, для него характерна и высокая газопоглотительная способность, позволяющая нейтрализовать их запах.

Водопоглощаемость торфа всегда меньше его полной влагоемкости. Особенно это относится к торфу, подвергнутому механическому, биологическому, химическому и другим видам воздействия [11].

Это объясняется необратимыми структурными изменениями, частичным обезвоживанием, изменениям в групповом химическом составе и т.п. Например, при механическом воздействии на залежь происходит ее уплотнение, а при проведении технологических операций по добыче





торфа разрушаются растительные остатки, способные удерживать большое количество воды.

При одной и той же влажности водопоглощаемость нативного торфа всегда выше, чем у торфа, подвергшегося механическому воздействию.

Такое многообразие факторов, влияющих на величину полной влагоемкости, позволяет рекомендовать ее в качестве одного из основных качественных показателей, характеризующих торфяное болото (или торф) как в естественном, так и в осушенном (сухом<sup>2</sup>) состоянии.

При переходе от торфяных залежей лесного к топяному подтипу полная влагоемкость увеличивается примерно в два раза. Отмечается тесная связь между полной влагоемкостью и глубиной (мощностью) торфяных залежей [12].

Меньшую глубину имеют, как правило, торфяные залежи низинного типа, которые характеризуются и наименьшими значениями полной влагоемкости. Торф наиболее глубоких комплексных залежей способен удержать в среднем 18 и более частей воды на одну часть сухого вещества, а мелких лесных низинных залежей всего лишь пять частей.

Торф средних слоев неосушенных залежей находится в большинстве случаев (особенно залежей верхового типа) в состоянии полного водонасыщения. Однако значения естественной влажности и полной влагоемкости часто различаются: величины полной влагоемкости превышают значения, влагосодержания залежей в естественном состоянии на 2...6 кг/кг. Эта разница тем больше, чем выше значение  $W_n$ , что объясняется частичным отжатием и потерями влаги при отборе, транспортировке и хранении проб, а также некоторым осушением торфяных залежей.

Полная влагоемкость имеет тесные корреляционные связи не только с характеристиками органического вещества торфа, но и с показателями его неорганической части: зольностью на сухое вещество, содержанием катионов кальция  $Ca^{2+}$  и суммарным содержанием катионов (для месторождений низинного типа).

В ходе впитывания влаги торфом его объем увеличивается за счет набухания отдельных компонентов твердого вещества. На кинетику этого процесса влияет исходное влагосодержание, степень разложения и компактность надмолекулярных структур торфа. Интенсивнее и в большем количестве поглощает загрязнения на водной основе моховой торф низкой степени разложения. При равной степени разложения и одинаковом влагосодержании низинный торф поглощает водные растворы и набухает медленнее и в меньшем количестве, чем верховой, вследствие более прочных межмолекулярных связей в его структуре.

При изучении механизма водопоглощения и набухания наибольший интерес представляет кинетика этого процесса (рис. 1).

Количественно водопоглощаемость торфа выражается влагосодержанием (отношением массы поглощенной воды к массе сухого вещества). Величина предельного водопоглощения  $B_m$  определяется за 48 ч, так как к этому времени процесс водопоглощения в основном заканчивается.

Интенсивность процесса оценивается константой  $K$ .

Скорость водопоглощения выражается уравнением [7]

$$\frac{dB_t}{dt} = K(B_m - B_t),$$

где  $B_t$  – водопоглощаемость торфа, %;  $B_m$  – предельное водопоглощение, %.

При интегрировании этого выражения определяется константа

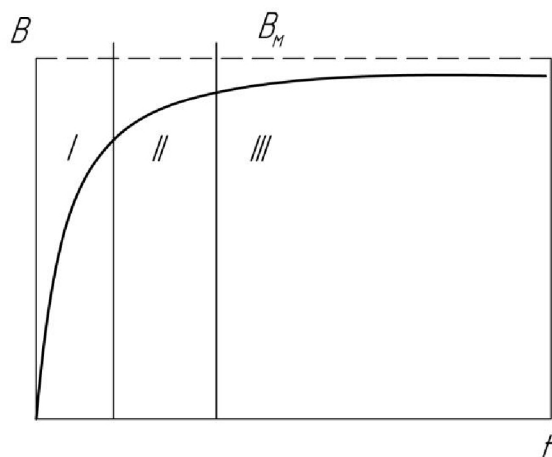
$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{B_m}{B_m - B_t}.$$

Механизм поглощения воды и загрязнений на водной основе сложными гетерогенными полукolloидно-высокомолекулярными системами, к которым относится и торф, является многостадийным (рис. 1 а). Поэтому для торфа график, построенный в координатах  $\lg B_m/(B_m - B_t) = f(t)$ , представляет ломаную линию (рис. 1 б), для каждого отрезка которой имеются свои константы, характеризующие скорость впитывания влаги на начальной ( $K_1$ ) и

<sup>2</sup> Имеется в виду в высушенном до влажностей меньших, чем полная влагоемкость.

заключительной ( $K_2$ ) стадиях.

а



б

$$\lg \frac{B_M}{B_M - B_t}$$

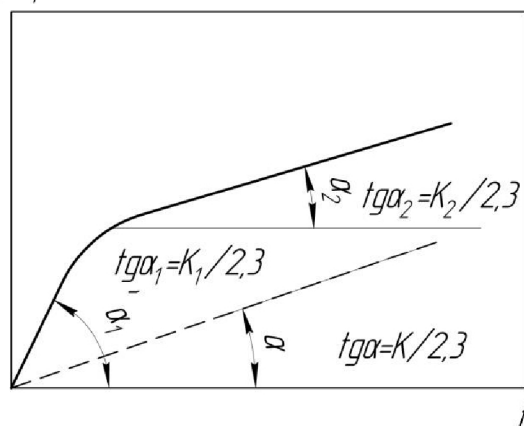


Рис. 1. Кинетика поглощения воды торфом в линейных (а) и полулогарифмических (б) координатах [7]

Для оценки изменения водно-физических свойств торфа и торфяных залежей при техногенном воздействии рассмотрим сначала механизм поглощения влаги торфом. Априори известно, что чрезвычайная неоднородность его состава и структуры определяет сложность механизма водопоглощения. Нативный торф характеризуется большой гидрофильностью. Надмолекулярные образования продуктов распада (ассоциаты и агрегаты), высокоэластичные коагуляционные структуры торфа, а также структуры переплетения (срастания) из остатков растений-торфообразователей и их отдельные элементы в процессе набухания поглощают большое количество воды [3, 4].

В процессе поглощения влаги торфом выделяют [6, 7] три стадии (рис. 1 а): две основные (начальную и заключительную) и переходную (промежуточную). На первой сорбционно-капиллярной стадии (I) происходит присоединение молекул воды к активным центрам макромолекул сухого вещества торфа. Этот процесс идет с выделением тепла. Сорбция воды приводит к ослаблению связи в надмолекулярных структурах торфа и за счет расклинивающего давления отдельные участки макромолекул становятся более подвижными. Одновременно со смачиванием торфа идет заполнение порового пространства водой за счет капиллярных эффектов и проникновения молекул воды в надмолекулярные структуры торфа, в результате чего происходит процесс набухания. Основное количество воды поглощается на этой быстротекущей стадии.

После заполнения ячеек порового пространства макроструктуры торфа скорость впитывания воды заметно снижается. Примерно с такой же закономерностью изменяется и скорость набухания. На этой переходной стадии (II) вода проникает в микропоры и менее доступные участки макро- и микроструктуры торфа [7].

Третья, энтропийно-осмотическая стадия (III) вызвана медленным впитыванием влаги торфом. Гидратация на этом этапе в основном завершена, поэтому идет энтропийное набухание надмолекулярных структур продуктов распада и растительных остатков. Этот процесс происходит за счет диффузии макромолекул органических компонентов торфа в среду. Молекулы воды быстрее проникают в торф, чем макромолекулы органического вещества в растворитель.

Вследствие замедленной скорости их перегруппировки создается разность концентраций внутри и снаружи гелеобразной структуры ассоциата. Это приводит к соответствующим различиям в активности среды.

Наряду с наличием в торфе гелеобразных пространственных структур, образованных из продуктов распада, а также остатков растений-торфообразователей и их фрагментов, являющихся полупроницаемыми мембранами, это различие в активности растворителя определяет проявление осмотического давления и давления набухания в процессе поглощения влаги торфяными системами.



Анализ таблицы 2 показывает, что константа  $K_2$  мало изменяется от влажности и, будучи величиной  $\ll 1$ , слабо влияет на общий процесс водопоглощения. Константа  $K_1$  в значительной степени зависит от пористой структуры и состояния торфа в зоне контакта с водой. Так как основное количество воды поглощается торфом на первой стадии, то можно считать, что ответственными за скорость впитывания и объем поглощенной воды являются капиллярные силы [9, 10] и пористая структура.

Таблица 2. Константы водопоглощения верхового магелланикум-торфа,  $R_T = 20\%$

Начальная влажность, %	Константы водопоглощения, $\text{мин}^{-1}$	
	$K_1$	$K_2$
84,9	20,7	0,124
77,9	12,0	0,128
70,4	5,38	0,138
55,5	5,04	0,123
27,1	5,13	0,138

Кроме того, если априори принять изменение средней влажности естественного и осушенного болота от 90 до 55 %, то становится очевидным ожидание высоких скоростей поглощения жидких отходов на водной основе. При этом скорость будет возрастать по мере увеличения влажности месторождения (табл. 2).

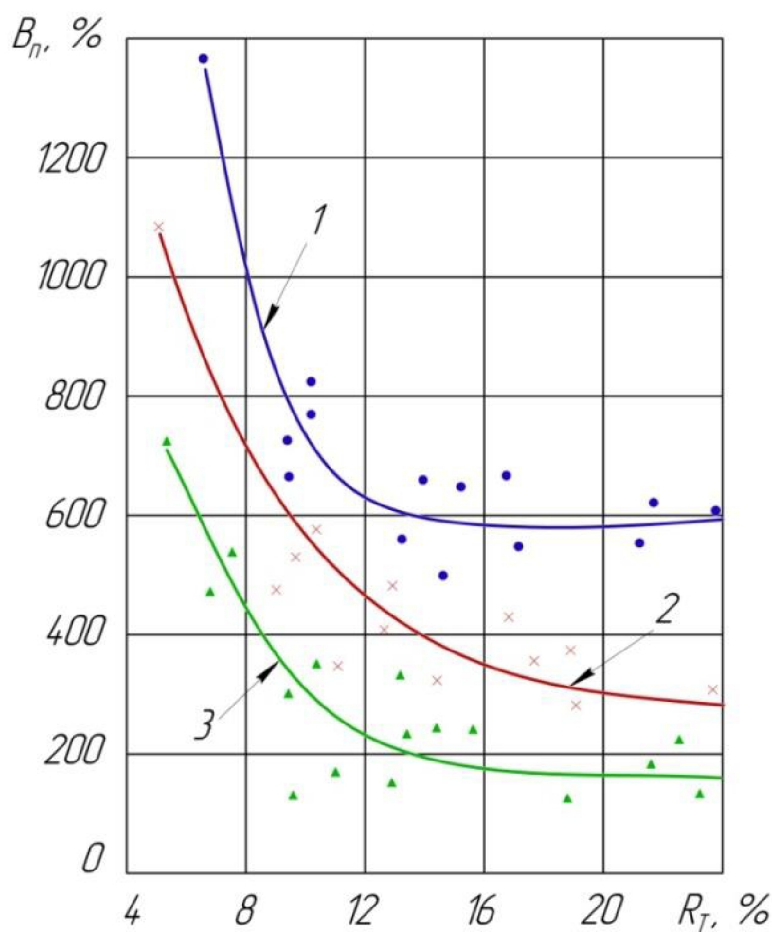


Рис. 2. Зависимость поглотительной способности  $B_n$  магелланикум торфа по раствору гидроксида аммония (1), жидким отходам животноводства (2) и воде (3) от степени разложения  $R_T$



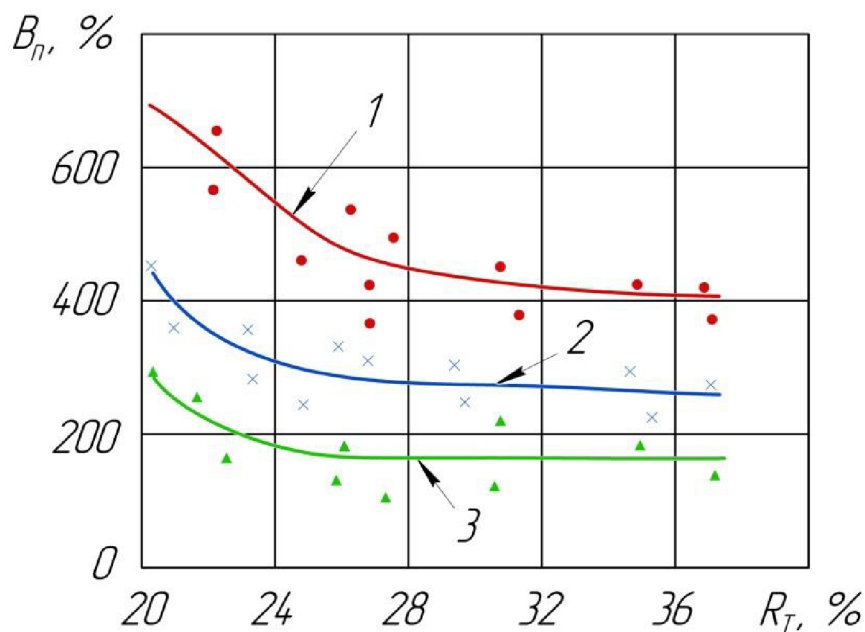


Рис. 3. Зависимость поглотительной способности  $B_n$  пушицево-сфагнового торфа по раствору гидроксида аммония (1), жидким отходам животноводства (2) и воде (3) от степени разложения  $R_T$

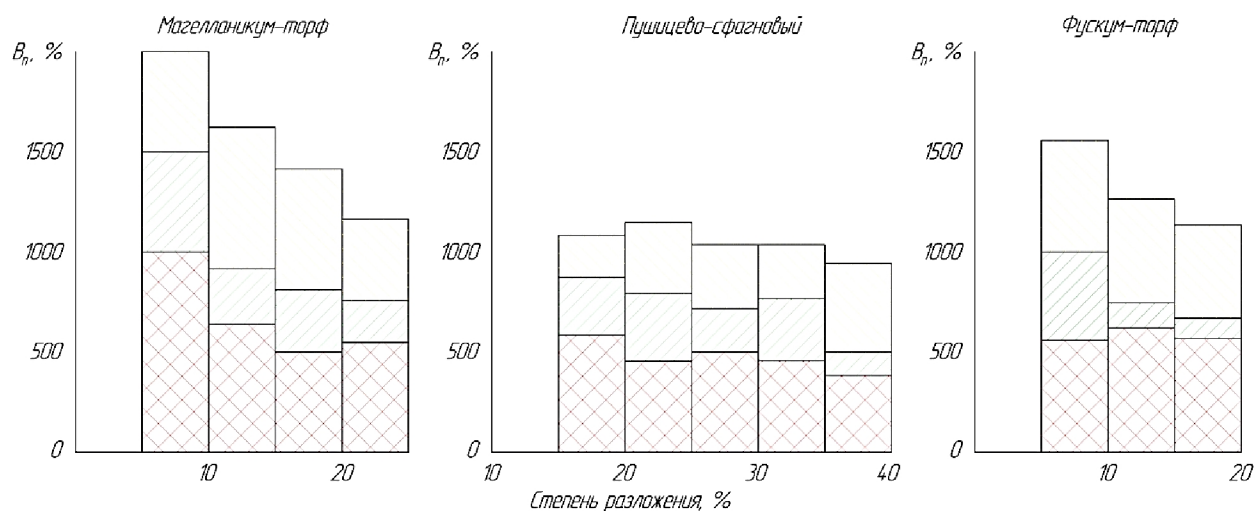


Рис. 4. Гистограммы распределения величины поглощения (соответственно снизу вверх) по воде, жидким отходам животноводства и раствору гидроксида аммония для различных видов торфа по интервалам степени разложения

Однако при влажности, близкой к состоянию полной влагоемкости, скорость этого процесса будет стремиться к нулю. Такие же закономерности справедливы и для торфа (или торфяных сорбентов).

При переходе от модельных представлений к реальному процессу поглощения органических отходов наблюдается увеличение максимальных значений поглотительных характеристик торфа. Так, в работе [13] была проведена комплексная оценка поглотительной способности различных видов и степеней разложения верхового (59 образцов), низинного (12 образцов) и переходного (2 образца) типов торфа.

При обобщении результатов сравнительного анализа процесса поглощения торфом воды, жидких отходов животноводства и модельного раствора гидроксида аммония была выявлена четкая тенденция увеличения поглотительной способности по жидким отходам и раствору аммиака



по сравнению с водой (рис. 2-4). Причем в ряде случаев поглотительная способность по отходам возрастает более чем в 2...2,5 раза по сравнению с водой.

На поглотительную способность по всем видам поглощаемого материала оказывали влияние ботанический состав, степень разложения, а также пористость структуры, обусловленная содержанием крупных и мелких фракций [14]. Верховой торф менее равноценен по способности поглощения жидких отходов и гидроксида аммония по сравнению с низинным. Для низинного торфа величины поглощения по исследованным загрязнителям имели близкие значения.

Выше отмечалось, что торф относится к ограниченно набухающим системам, в которых поглощение среды сопровождается осмотическим проникновением ее молекул внутрь гелеобразной структуры до неполного растворения вещества. Этот процесс продолжается до тех пор, пока напряжения в пространственной сетке набухающих коагуляционных структур и структур переплетения не уравниваются давления набухания [15]. Однако представленные данные справедливы для ограниченного объема материала (сорбента), в котором отсутствует вынос загрязнителя (сорбата) движением потока влаги. Между тем в природных объектах (болотах) практически всегда наблюдается передвижение воды под влиянием градиентов давления (напор), называемое фильтрацией [6, 8]. Большое значение процессы фильтрации воды имеют при осушении, обводнении торфяных месторождений (капиллярно-пористых телах), при расчете консолидации торфяных оснований, а также при сбросе различных видов загрязнений на водной основе.

Характер течения жидкостей в капиллярно-пористых системах непосредственно определяется как геометрией их порового пространства (размер, форма пор и т. д.), так и особенностями физико-химического строения, состава дисперсной фазы, дисперсионной среды и взаимодействия между ними. Особенно велико влияние всех упомянутых факторов на процессы фильтрации воды в торфе, имеющем сложное коллоидно-химическое строение твердой и жидкой фаз и отличающемся высокой сжимаемостью при приложении нагрузки.

Водопроницаемость торфа определяется преимущественно геометрией макропор между агрегатами, то есть его макроструктурой [16]. Кроме того, торфяные залежи обладают неупорядоченным строением и содержат множество неоднородностей (крупные полости, ходы, «жилы» или «сверхмакроструктура»), по которым возможно передвижение большого количества воды так называемым струйным механизмом.

Под влиянием сравнительно небольших нагрузок (до 50 кПа) происходит уплотнение торфа, вызывающее значительную перестройку в структуре порового пространства (уменьшение размеров пор, изменение формы и т. п.).

В связи с этим увеличивается сопротивление переносу жидкости. Без уплотнения фильтрация осуществляется благодаря крупным порам и протекает в соответствии с законом Дарси [8]:

$$i_{\phi} = -k_{\phi} \frac{dP}{dx},$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент фильтрации;  $dP/dx$  – градиент давления.

Для определения объема  $V$  профильтровавшейся жидкости используется формула [6]:

$$V = k_{\phi} S t Y,$$

где  $S$  – площадь сечения «фильтрации»;  $t$  – время;  $Y$  – гидравлический градиент напора.

При уплотнении залежи наблюдается значительное уменьшение водопроницаемости торфа и повышение роли физико-химических факторов, в том числе осмотических и поверхностных эффектов на передвижение воды. В этом случае обнаруживаются отклонения от закона Дарси. Возникает так называемый начальный градиент фильтрации  $Y_0$ . В этом случае скорость фильтрации будет выражаться уравнением:  $v = k_{\phi} (Y - Y_0)$ .

Особенности торфообразовательного процесса наложили свой отпечаток на структуру торфяных залежей [12], относящихся к гетерогенным анизотропным телам. Поэтому достаточно сложная картина взаимодействия водопроводящих путей в торфе существенно меняется при смене направления фильтрационного потока, а его водопроницаемость при этом может отличаться на несколько порядков. При уплотнении торфа происходит выравнивание структуры его порового пространства за счет сужения интервалов размеров водопроводящих пор и уменьшение анизотропности.



На передвижение воды в торфе оказывают влияние и процессы, связанные с набуханием его компонентов. В результате набухания изменяется его структура, в частности, уменьшается объем межагрегатного порового пространства, по которому происходит фильтрация воды. Экспериментально установлено [4, 5], что биологические факторы не оказывают заметного влияния на фильтрацию воды в торфе.

Торф чрезвычайно чувствителен к изменениям внешних условий, приводящим к смещению динамического ионнодисперсионного равновесия как в сторону агрегирования, так и в сторону химического диспергирования коллоидно-высокомолекулярной составляющей. Об этом свидетельствуют, в частности, опыты по фильтрации через торф дистиллированной воды, значительно отличающейся от природной дисперсионной среды [5, 7]. Со временем уменьшается коэффициент фильтрации жидкости и увеличивается значение pH. Одновременно происходит вымывание из торфа катионов. Это влечет за собой диффузию их и водородных ионов из внутриассоциатного объема в межагрегатный транзитный поток жидкости, а также дополнительную диссоциацию функциональных групп. В результате этих процессов уменьшается число водородных связей и ионное (гетерополярное) взаимодействие между макромолекулами коллоидно-высокомолекулярной составляющей торфа. Ослабление же связей вызывает самопроизвольное диспергирование агрегатов торфа и набухание его растительных остатков, а также гумифицированной части. Таким образом, уменьшается объем активного (проводящего жидкость) порового пространства и соответственно снижается расход жидкости [3, 4].

Отмеченные выше явления наиболее отчетливо проявляются на начальной стадии фильтрации, когда диссоциируют функциональные группы и вытесняются ионы металлов и водорода из наиболее доступных периферийных зон торфяных агрегатов, поэтому именно в начале экспериментов [7, 16] наблюдалось резкое снижение коэффициента фильтрации и рост значений pH. В последующем по мере отступления областей диссоциации и ионного обмена вглубь ассоциатов темп процессов, связанных с поступлением ионов металлов и водорода в фильтрационный поток, замедлялся. Поэтому на данном этапе pH незначительно растет, а  $k_f$  медленно снижается. Через определенный промежуток времени устанавливается относительное динамическое ионнодиспергированное равновесие в торфе, характеризующееся постоянством значений pH и коэффициентов фильтрации.

Таким образом, большая чувствительность торфа к изменениям внешних условий, приводящая к значительной перестройке его структуры, с одной стороны, затрудняет изучение протекающих в нем процессов, а с другой – открывает широкие возможности направленного регулирования его фильтрационных свойств физико-механическими и физико-химическими методами.

В связи с тем, что торф является легкоподвижной системой, значительные изменения в его макроструктуре могут быть достигнуты простыми и доступными приемами уплотнения или разуплотнения. Соответствующая реализация пористой структуры торфа приводит к существенным колебаниям в его водопроницаемости. Например, рыхление верхних слоев торфяной залежи (в технологии добычи торфа) улучшает фильтрацию воды и нарушает капиллярную связь с нижележащими пластами.

С другой стороны, поверхностное уплотнение торфяной залежи способствует лучшему сбросу воды атмосферных осадков в осушители. Так как при осушении торфяной залежи происходит резкое снижение ее водопроницаемости за счет уплотнения, то для улучшения фильтрационной способности торфа и уменьшения его влаги применяют дрены (закрытые осушители) в дополнение к открытым каналам [17-19].

На водопроницаемость торфа влияют и другие способы механического воздействия. Например, перемешивание и переработка (при одном коэффициенте пористости) снижает фильтрационную способность торфа. Причиной этого служит нарушение естественных водопроводящих каналов. При перемешивании, особенно при переработке, торф из грубодисперсной системы переходит в тонкодисперсную. В результате уменьшаются размеры водопроводящих пор за счет измельчения растительных остатков и увеличения содержания мелких частиц.

Однако уменьшение водопроницаемости при компрессии наиболее интенсивно происходит в торфе с естественной структурой (залежь), чем с перемешанной и переработанной (продукт механической переработки).

Это объясняется тем, что в торфе естественной структуры наиболее интенсивно





уменьшается активная пористость в начальный момент при приложении небольших нагрузок за счет ликвидации крупных пор [20]. В результате переработки размеры водопроводящих пор в торфе становятся более однородными. При уплотнении такого торфа происходит в основном переупаковка частиц.

При попадании в торф (болота, торфяные сорбенты) различных видов загрязнителей фильтрационные свойства будут изменяться, поскольку, по сути, будет происходить его химическое модифицирование. Его оценивают по влиянию на торфяные системы химических добавок – модификаторов (коагулянтов и пептизаторов). К ним относятся неорганические (соли металлов  $\text{FeCl}_3$  и  $\text{CaCl}_2$ , щелочи  $\text{NaOH}$  и др.), кремнийорганические, поверхностно-активные вещества (ПАА<sup>3</sup>, ГиПАН<sup>4</sup>, фенолы) и другие высоко- и низкомолекулярные соединения. В работах [18, 19] была показана эффективность управления структурообразовательными процессами в торфе путем воздействия на него различными ПАВ.

С введением химических модификаторов в торф процессы структурообразования обязаны главным образом взаимодействию функциональных групп с ионами и молекулами вводимых добавок и выражаются в повышении или понижении растворимости компонентов. При этом происходит сдвиг динамического равновесия в сторону компактного агрегирования или истинного раствора. Эффект действия модифицирующих веществ зависит от коллоидно-высокомолекулярной природы торфа. При действии электролитов на торф происходит коагуляция, сопровождающаяся уплотнением его ассоциатов и переходом иммобилизованной воды в свободную.

**Выводы.** Таким образом, проанализированный в статье информационный материал показывает, что сброс в торфяную залежь вод, загрязненных различными соединениями (использование болота в качестве естественного природного фильтра), может вызвать ряд как отрицательных, так и положительных (с точки зрения поглотительной и фильтрационной способностей) эффектов, причем это будет зависеть от вида загрязнителя, а также от степени осушенности залежи. Различные виды биогенных загрязнений достаточно надежно будут связываться торфом с низкой влажностью (менее 50 %). Увеличение влажности месторождения (снижение нормы осушения) будет уменьшать предельное количество сбросов, поглощаемых объектом. Но в тоже время, зная количество воды, необходимое для увеличения влажности торфа до состояния полной влагоемкости, можно прогнозировать количество связываемых отходов (например, животноводства) с повышающим коэффициентом 1,5...2. Если в роли загрязняющих веществ будут выступать водорастворимые химические соединения, то, как было показано выше, задача предельно усложняется, поскольку ее решение будет зависеть от многих факторов. К ним относятся свойства залежи, характеристик торфа, вида химических соединений, их концентрации и т. п. В связи с этим ее теоретические решения практически невозможны и необходимо применять эмпирический подход, связанный с лабораторными и натурными исследованиями на конкретном объекте с конкретными загрязняющими компонентами.

Если же применять торф в качестве сорбционного материала непосредственно в местах ликвидации загрязнений (животноводческие фермы, очистные сооружения, разливы загрязнений и т. п.), то задача предельно упрощается, и его использование будет приводить преимущественно к положительным результатам, причем проведение утилизации системы «сорбент-сорбат» через компостирование позволяет дополнительно получать высококачественные органические удобрения и решения задач по повышению плодородия почв.

<sup>3</sup> ПАА (полиакриламид) – общее название группы полимеров и сополимеров на основе акриламида и его производных. Используется в качестве коагулянта и флокулянта для очистки питьевой воды, технологических сточных вод и др.

<sup>4</sup>ГиПАН (гидролизированный полиакрилонитрил) – реагент, получаемый методом статической полимеризации нитрила акриловой кислоты в среде растворителя водного конденсата с последующим гидролизом едким натром



## Список источников

1. Базин, Е.Т. Физико-механические свойства торфяных залежей / Е.Т. Базин, Ю.Н. Женихов // Калинин: КГУ, 1982. – 84 с.
2. Базин, Е.Т. Физика и химия торфа. Водно-физические и структурно-механические свойства торфа и торфяных залежей. / Е.Т. Базин, В.И. Косов // Калинин: КГУ, 1982. – 104 с.
3. Лиштван, И.И. Физические свойства торфа и торфяных залежей / И.И. Лиштван, Е.Т. Базин, В.И. Косов // Мн.: Наука и техника, 1985. – 240 с.
4. Лиштван, И.И. Физические процессы в торфяных залежах / И.И. Лиштван, Е.Т. Базин, В.И. Косов // Мн.: Наука и техника, 1989. – 287 с.
5. Лиштван, И.И. Основные свойства торфа и методы их определения / И.И. Лиштван, Н.Т. Король // Мн.: Наука и техника, 1975. – 319 с.
6. Лиштван, И.И. Физико-химические основы технологии торфяного производства / И.И. Лиштван, А.А. Тереньгев, Е.Т. Базин, А.А. Головач. Мн.: Наука и техника. 1983 – 232 с.
7. Лиштван, И.И. Физика и химия торфа / И.И. Лиштван, Е.Т. Базин, Н.И. Гамаюнов, А.А. Тереньгев. М.: Недра. 1989 – 304 с.
8. Лундин, К.П. Водные свойства торфяных залежей / К.П. Лундин // Мн.: Урожай, 1964. – 211 с.
9. Афанасьев, А.Е. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства / А.Е. Афанасьев, Н.В. Чураев // М.: Недра, 1992. – 288 с.
10. Антонов, В.Я. Технология полевой сушки торфа / В.Я. Антонов, Л.М. Малков, Н.И. Гамаюнов. М.: Недра, 1981. – 239 с.
11. Мисников, О.С. Процессы переработки торфа и сапропеля / О.С. Мисников, О.В. Пухова // Тверь: ТвГТУ, 2014. – 164 с.
12. Тюремнов, С.Н. Торфяные месторождения / С.Н. Тюремнов // М.: Недра, 1976. – 488 с.
13. Базин, Е.Т. Разработка физико-химических основ и САПР ресурсосберегающих технологий комплексного освоения торфяных месторождений с учетом охраны окружающей среды / Е.Т. Базин, Л.Н. Павлова // Отчет по НИР. Калинин. КПИ. 1986. – 63 с.
14. Мисников, О.С. Физико-химические основы торфяного производства / О.С. Мисников, О.В. Пухова, Е.Ю. Чертова // Тверь: ТвГТУ, 2015. – 168 с.
15. Гамаюнов, Н.И. Сорбция в гидрофильных материалах / Н.И. Гамаюнов, С.Н. Гамаюнов // Тверь: ТвГТУ, 1997. 159 с.
16. Базин, Е.Т. Технический анализ торфа / Е.Т. Базин, В.Д. Копенкин, В.И. Косов // М.: Недра, 1992. – 431 с.
17. Халявкин, Ф.Г. Осушение торфяных месторождений / Ф.Г. Халявкин // Мн.: Выш. школа, 1986. – 194 с.
18. Мисников, О.С. Мероприятия по улучшению осушения производственных площадей при разработке торфяного месторождения / О.С. Мисников, О.В. Пухова, С.С. Цымлякова // Научно-технический вестник Поволжья, – 2012. – № 5. – С. 244-248.
19. Болтушкин, А.Н. Гидротехника: учебное пособие / А.Н. Болтушкин, О.В. Пухова, А.Е. Тимофеев. Изд. 1-е, Тверь: ТГТУ, 2013. – 160 с.
20. Афанасьев, А.Е. Оценка структурных характеристик при сушке формованных органических и органоминеральных биогенных материалов / А.Е. Афанасьев, О.С. Мисников // Теоретические основы химической технологии, – 2003. – Т. 37. – № 6. – С. 620-628.
21. Абрамцев, А.М. Массоперенос в природных дисперсных системах / А.М. Абрамцев, И.И. Лиштван, Н.В. Чураев // Мн.: Наука и техника, 1992. – 288 с.
22. Суворов В.И. Научные основы формирования структуры торфа в технологиях получения продукции с заданными свойствами: дис. ... докт. техн. наук. Тверь, 2000. – 513 с.

## References

1. Bazin, Ye.T. Fiziko-mekhanicheskiye svoystva torfyanykh zalezhey / Ye.T. Bazin, YU.N. Zhenikhov // Kalinin: KGU, 1982. – 84 s.
2. Bazin, Ye.T. Fizika i khimiya torfa. Vodno-fizicheskiye i strukturno-mekhanicheskiye svoystva torfa i torfyanykh zalezhey. / Ye.T. Bazin, V.I. Kosov // Kalinin: KGU, 1982. – 104 s.
3. Lishtvan, I.I. Fizicheskiye svoystva torfa i torfyanykh zalezhey / I.I. Lishtvan, Ye.T. Bazin, V.I. Kosov // Mn.: Nauka i tekhnika, 1985. – 240 s.
4. Lishtvan, I.I. Fizicheskiye protsessy v torfyanykh zalezhakh / I.I. Lishtvan, Ye.T. Bazin, V.I. Kosov // Mn.: Nauka i tekhnika, 1989. – 287 s.



5. Lishtvan, I.I. Osnovnyye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya / I.I. Lishtvan, N.T. Korol' // Mn.: Nauka i tekhnika, 1975. – 319 s.
6. Lishtvan, I.I. Fiziko-khimicheskiye osnovy tekhnologii torfyanogo proizvodstva / I.I. Lishtvan, A.A. Terent'yev, Ye.T. Bazin, A.A. Golovach. Mn.: Nauka i tekhnika. 1983 – 232 s.
7. Lishtvan, I.I. Fizika i khimiya torfa / I.I. Lishtvan, Ye.T. Bazin, N.I. Gamayunov, A.A. Terent'yev. M.: Nedra. 1989 – 304 s.
8. Lundin, K.P. Vodnyye svoystva torfyanykh zalezhey / K.P. Lundin // Mn.: Urozhay, 1964. – 211 s.
9. Afanas'yev, A.Ye. Optimizatsiya protsessov sushki i strukturoobrazovaniya v tekhnologii torfyanogo proizvodstva / A.Ye. Afanas'yev, N.V. Churayev // M.: Nedra, 1992. – 288 s.
10. Antonov, V.YA. Tekhnologiya polevoy sushki torfa / V.YA. Antonov, L.M. Malkov, N.I. Gamayunov. M.: Nedra, 1981. – 239 s.
11. Misnikov, O.S. Protsessy pererabotki torfa i sapropelya / O.S. Misnikov, O.V. Pukhova // Tver: TvGTU, 2014. – 164 s.
12. Tyuremnov, S.N. Torfyanyye mestorozhdeniya / S.N. Tyuremnov // M.: Nedra, 1976. – 488 s.
13. Bazin, Ye.T. Razrabotka fiziko-khimicheskikh osnov i SAPR resursosbere-gayushchikh tekhnologiy kompleksnogo osvoiniya torfyanykh mestorozhdeniy s uchetom okhrany okruzhayushchey sredy / Ye.T. Bazin, L.N. Pavlova // Otchet po NIR. Kalinin. KPI. 1986. – 63 s.
14. Misnikov, O.S. Fiziko-khimicheskiye osnovy torfyanogo proizvodstva / O.S. Misnikov, O.V. Pukhova, Ye.YU. Chertkova // Tver: TvGTU, 2015. – 168 s.
15. Gamayunov, N.I. Sorbtsiya v gidrofil'nykh materiala / N.I. Gamayunov, S.N. Gamayunov // Tver: TvGTU, 1997. 159 s.
16. Bazin, Ye.T. Tekhnicheskii analiz torfa / Ye.T. Bazin, V.D. Kopenkin, V.I. Kosov // M.: Nedra, 1992. – 431 s.
17. Khalyavkin, F.G. Osusheniye torfyanykh mestorozhdeniy / F.G. Khalyavkin // Mn.: Vysh. shkola, 1986. – 194 s.
18. Misnikov, O.S. Meropriyatiya po uluchsheniyu osusheniya proizvodstvennykh ploshchadey pri razrabotke torfyanogo mestorozhdeniya / O.S. Misnikov, O.V. Pukhova, S.S. Tsymlyakova // Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya, – 2012. – № 5. – S. 244-248.
19. Boltushkin, A.N. Gidrotekhnika: uchebnoye posobiye / A.N. Boltushkin, O.V. Pukhova, A.Ye. Timofeyev. Izd. 1-ye, Tver: TGTU, 2013. – 160 s.
20. Afanas'yev, A.Ye. Otsenka strukturnykh kharakteristik pri sushke formovannykh organicheskikh i organomineral'nykh biogennykh materialov / A.Ye. Afanas'yev, O.S. Misnikov // Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii, – 2003. – T. 37. – № 6. – S. 620-628.
21. Abramets, A.M. Massoperenos v prirodnykh dispersnykh sistemakh / A.M. Abramets, I.I. Lishtvan, N.V. Churayev // Mn.: Nauka i tekhnika, 1992. – 288 s.
22. Suvorov V.I. Nauchnyye osnovy formirovaniya struktury torfa v tekhnologiyakh polucheniya produktsii s zadannymi svoystvami: dis. ... dokt. tekhn. nauk. Tver', 2000. – 513 s.

#### Авторы

##### **Мисников Олег Степанович,**

доктор технических наук, заведующий кафедрой геотехнологии и торфяного производства, декан факультета природопользования и инженерной экологии

e-mail: oleg.misnikov@gmail.com

Тверской государственный технический университет

170026, Российская Федерация, Тверская область, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22

Инжиниринговая компания «SGP»

Российская Федерация, г. Кемерово, 650066, пр. Октябрьский, 28Б

#### Authors

##### **Oleg S. Misnikov**

Dr. Sc. (Tech.), Head of the Department of Geotechnical Engineering and Peat Production, Dean of the Faculty of Environmental Management and Engineering Ecology

e-mail: oleg.misnikov@gmail.com

Tver State Technical University

Russian Federation, Tver, 22 Afanasiy Nikitin embankment, 170026

#### Библиографическое описание статьи

#### Cite this article





Мисников О.С.

Изменения водно-физических свойств торфа и торфяных залежей при техногенном воздействии

DOI: 10.26730/2618-7434-2019-2-19-32

Мисников, О.С. Изменения водно-физических свойств торфа и торфяных залежей при техногенном воздействии // Техника и технология горного дела. – 2019. – № 2 (5). – С. 19-32.

Misnikov O.S. (2019) Changes in water-physical properties of peat and peat deposits under human impact, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 2(5):19.