

Исследование закономерностей изменения солевого состава буровых шламов в процессе их утилизации

© 2024. Е. В. Гаевая¹, к. б. н., доцент,

Л. В. Рудакова², д. т. н., профессор, зав. кафедрой,

¹Тюменский индустриальный университет,

625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38,

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,

e-mail: gaevajaev@tyuiu.ru, larisa.rudakova.007@gmail.com

Буровой шлам в естественном состоянии обладает вязко-пластичными свойствами, в сухом состоянии отличается слитностью и твёрдостью. Это обусловлено содержанием ионов натрия в поглощающем комплексе. Особенности физико-механических свойств бурового шлама указывают на способность его к поглощению и удерживанию растворённых солей. При внесении гипса в буровой шлам в разных процентных соотношениях от объёма отхода происходит изменение концентрации хлорид-иона во всех образцах, при этом наблюдается хлоридно-сульфатное засоление. Содержание сульфат-иона возрастает при минимальной объёмной доле внесения гипса. Внесение гипса в объёмной доле 15 и 20% влияет на снижение содержания фосфат- и карбонат-ионов. Изменение электропроводности свидетельствует об увеличении концентрации водорастворимых солей в водной вытяжке, что подтверждает прямая высокая корреляционная связь. При внесении гипса от 7–20% объёмных долей происходит существенное снижение плотного остатка. Использование гипса увеличивает фильтрационную способность бурового шлама. Применение гипса позволяет облегчить гранулометрический состав бурового шлама за счёт активной коагуляции коллоидов. В результате выноса водорастворимых солей создаются оптимальные водно-физические свойства буровых шламов, происходит структурирование и повышение фильтрационных свойств бурового шлама. Математическая модель прогноза растворения солей в буровом шламе позволяет учитывать неуправляемые факторы (плотность, гранулометрический состав, коэффициент фильтрации, содержание водорастворимых солей).

Ключевые слова: буровой шлам, солевой состав, коэффициент скорости растворения.

Study of patterns of changes in salt composition drill cuttings in the process of their disposal

© 2024. E. V. Gaevaya¹ ORCID: 0000-0002-0631-9149¹

L. V. Rudakova² ORCID: 0000-0003-3292-8359²

¹Tyumen Industrial University,

38, Volodarsky St., Tyumen, Russia, 625000,

²Perm National Research Polytechnic University,

29, Komsomolskiy Pr., Perm, Russia, 614990,

e-mail: gaevajaev@tyuiu.ru, larisa.rudakova.007@gmail.com

Drill cuttings in their natural state have viscous-plastic properties; in a dry state they are cohesive and hard. This is due to the content of sodium ions in the absorbing complex. Features of the physical and mechanical properties of drill cuttings indicate its ability to absorb and retain dissolved salts. When gypsum is added to drill cuttings in different percentages of the waste volume, the concentration of chloride ion changes in all samples, and chloride-sulfate salinization is observed. The content of sulfate ion increases with a minimum volume fraction of gypsum application. The addition of gypsum in a volume fraction of 15 and 20% affects the reduction of phosphate and carbonate ions. A change in electrical conductivity indicates an increase in the concentration of water-soluble salts in the water extract, which is confirmed by a direct high correlation. When adding gypsum from 7–20% volume fractions, a significant reduction in the dense residue occurs. The use of gypsum increases the filtration capacity of drill cuttings. The use of gypsum makes it possible to lighten the granulometric composition of drill cuttings due to the active coagulation of colloids. As a result of the removal of water-soluble salts, optimal water-physical properties of drill cuttings are created, structuring and filtration properties of drill cuttings are increased. A mathematical model for predicting the dissolution of salts in drill cuttings allows taking into account uncontrollable factors (density, particle size distribution, filtration coefficient, content of water-soluble salts).

Keywords: drill cuttings, salt composition, dissolution rate coefficient.

Утилизация буровых отходов в основном связана с внесением смеси различных компонентов или природных материалов, позволяющих снижать их токсический эффект за счёт протекающих физико-химических реакций [1–3].

Применение разных типов буровых растворов при бурении скважин, в состав которых входят такие компоненты, как едкий калий, кальцинированная сода, хлорид кальция, хлорид калия, известь и т. д., оказывает токсическое действие на компоненты природной среды. Щёлочность буровых шламов связана с высоким содержанием водорастворимых солей и является причиной негативного воздействия на почвенный покров и растительность [4–6].

Токсичность буровых отходов обусловлена высоким содержанием солей (хлориды, фосфаты, карбонаты, сульфаты), некоторые из них вызывают щёлочность и высокую гидрофильность шлама. Исследования авторов по снижению водорастворимых солей в буровых шламах с применением различных мелиорантов-коагулянтов отражены в работах [7–9]. Наиболее важным показателем направленности снижения токсичности буровых шламов является изменение солевого состава. Применение коагулянтов ($Al_2(SO_4)_3$, $CaCl_2$, $CaCO_3$) свидетельствует о возможности изменения водно-физических и химических свойств бурового шлама [10–14].

Водорастворимые соли в буровых шламах находятся в разных состояниях в зависимости от их количества и свойств, влажности и структуры порового пространства бурового шлама. Часть солей находится в растворе, где они диссоциируют на ионы с различной степенью подвижности. Часть ионов адсорбирована твёрдой фазой бурового шлама.

Движение солей в буровом шламе может осуществляться при поступлении влаги в шлам, её передвижении и расходе, изменении её физического состояния. Осложняется этот процесс электрокинетическим явлением, вызванным диффузионным процессом из-за разности концентрации раствора, влиянием осмотического явления, термодиффузионным процессом из-за разности температур, процессом растворения и кристаллизации солей.

Снижение токсических свойств буровых шламов возможно осуществлять за счёт изменения химического (солевого) состава путём внесения химических реагентов, например, гипса, фосфогипса и др. Этот процесс производится путём смешения в определённых пропорциях реагентов и буровых шламов [15].

Целью исследований является выявление закономерностей изменения солевого состава буровых шламов в процессе ионно-обменной реакции при использовании гипса, а также разработка математической модели растворения солей.

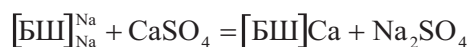
Объекты и методы исследования

Буровой шлам в естественном состоянии обладает вязко-пластичными свойствами, в сухом состоянии отличается слитностью и твёрдостью. Это обусловлено содержанием соединений натрия в поглощающем комплексе. Буровой шлам обладает высокой щёлочностью, рН составляет 8,5–11,0. С целью улучшения физико-химических свойств бурового шлама необходимо вытеснить поглощённые ионы натрия кальцием с применением гипса в качестве коагулянта.

Буровой шлам имеет градацию массы от текучей до тугопластичной, от чёрного до светло-серого цвета, в зависимости от глубины забоя с включениями различного диаметра, по характеристике грунтов относится к типу от суглинка лёгкого до глины тяжёлой. В рамках исследований был изучен буровой шлам на солевом буровом растворе на водной основе (БШ_{сво}), буровой шлам на полимер-глинистом буровом растворе на водной основе (БШ_{гр}), буровой шлам на ингибированном полимер-глинистом буровом растворе на водной основе (БШ_{ингр}), буровой шлам на буровом растворе на углеводородной основе (БШ_{руо}).

Буровой шлам – измельчённая выбуренная горная порода, содержащая остатки бурового раствора, буровых сточных вод и флюидов из пластов скважин. Буровой шлам представлял собой мелкодисперсную глинистую массу, влажность которой на момент исследования составляла 32%, истинная плотность – 2,1 г/см³.

Для снижения токсичности бурового шлама использовали гипс – белое либо сероватое порошкообразное вещество тонкого помола, полученное путём переработки природного минерала из класса сульфатов методом обжига при повышенных температурах. Химическая формула: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (гидрат сульфата кальция). При внесении коагулянта катионы Na^+ , придающие буровому шламу состояние золя, замещаются на катионы Ca^{2+} , способствующие снижению содержания плотного остатка в водной вытяжке:



В результате ионно-обменной реакции происходит увеличение содержания сульфатов, что обусловлено продуктами обменных реакций (Na_2SO_4).

Внесение гипса в буровой шлам осуществляли в следующем соотношении (в %): буровой шлам + гипс (97:3); буровой шлам + гипс (95:5); буровой шлам + гипс (93:7); буровой шлам + гипс (90:10); буровой шлам + гипс (85:15); буровой шлам + гипс (80:20). Далее буровой шлам и гипс перемешивали до однородной массы.

Плотный остаток водной вытяжки, водородный показатель и удельную электрическую проводимость определяли в соответствии с ГОСТ 26423-85, коэффициент фильтрации – по ГОСТ 25584-2016. Гранулометрический состав определён на лазерном анализаторе частиц «Analysette 22» MicroTecPlus. Концентрации водорастворимых солей определяли в соответствии с ГОСТ 26424-85 и ПНД Ф 16.1:2.3:2.2.69-10.

Результаты и обсуждение

Особенности физико-механических свойств (влажность, плотность, поровое пространство) бурового шлама указывают на способность к поглощению и удерживанию растворённых солей. С помощью силы молекулярного притяжения частицы способны притягивать и удерживать молекулы различных веществ на поверхности. Насыщенность бурового шлама мельчайшими частицами (коллоидными) влияет на его способность поглощать вещества из раствора. Такая связь основана на силе молекулярного притяжения (адсорбции). Одноимённость электрических зарядов коллоидных частиц препятствует соединению друг с другом в более крупные агрегаты.

Ёмкость поглощения бурового шлама возрастает с увеличением коллоидов, поглощённые катионы удерживаются на поверхности коллоидных частиц и могут быть вытеснены обратно другими катионами. Вследствие этого поглощение ионов является обменом катионов на поверхности мельчайших частиц бурового шлама. Поглощающий комплекс бурового шлама благодаря адсорбционной способности отрицательно заряженных коллоидных частиц насыщен катионами. Качественный состав поглощённых катионов зависит от химических реагентов, входящих в буровой раствор [16–19].

Высокая щёлочность ухудшает водно-физические свойства буровых шламов и усиливает пептизацию коллоидов. Результаты

исследований внесения гипса в различных объёмных долях в буровой шлам, образованный на разных типах буровых растворов, представлены на рисунках 1 и 2.

При внесении гипса в буровой шлам в разных процентных соотношениях от объёма отхода (3–20%) происходит изменение концентрации хлорид-иона во всех образцах, при этом выявляется хлоридно-сульфатное засоление. Содержание сульфат-иона возрастает до 3 раз при минимальной объёмной доле внесения гипса. Минимальные значения карбонат-ионов наблюдали при внесении гипса в объёмных долях 15 и 20%. Внесение гипса в объёмной доле 20% влияло на снижение содержания фосфат-ионов в 2 раза (рис. 3).

Плотный остаток водной вытяжки даёт представление об общем содержании растворимых в воде органических и минеральных соединений (табл. 1).

При внесении гипса от 7 до 20% происходит существенное снижение плотного остатка, при этом наблюдается высокая обратная корреляционная связь $r = -0,70$. На основании полученных результатов анализа плотного остатка водной вытяжки образцы мелиорированных буровых шламов по степени засоленности грунтов относились к незасоленным (содержание легкорастворимых солей $< 0,5\%$) и слабозасоленным (0,5–1,0%).

Одной из важнейших характеристик почв и грунтов является водопроницаемость, то есть способность впитывать и фильтровать воду. Численной характеристикой водопроницаемости является коэффициент фильтрации. Фильтрационная способность почв и грунтов различного гранулометрического состава отличается. Наибольший коэффициент фильтрации наблюдается у грунтов с большим размером частиц, и, наоборот, – чем меньше частицы грунта, тем хуже осуществляется фильтрация воды. Супесь и суглинок обладают промежуточными значениями фильтрационной способности в зависимости от того, какие размеры частиц преобладают в их составе [20–22].

Коэффициенты фильтрации в буровом шламе приближены к нулю, т. е. фильтрация отсутствовала, отход относился к водонепроницаемым грунтам (табл. 2).

Внесение гипса в буровой шлам увеличивает фильтрационную способность. Наилучший результат наблюдали при 10–20% объёмной доли в буровых шламах на солевом буровом растворе, ингибированном полимер-глинистом буровом растворе и на отдельно взятом полимер-глинистом буровом растворе.

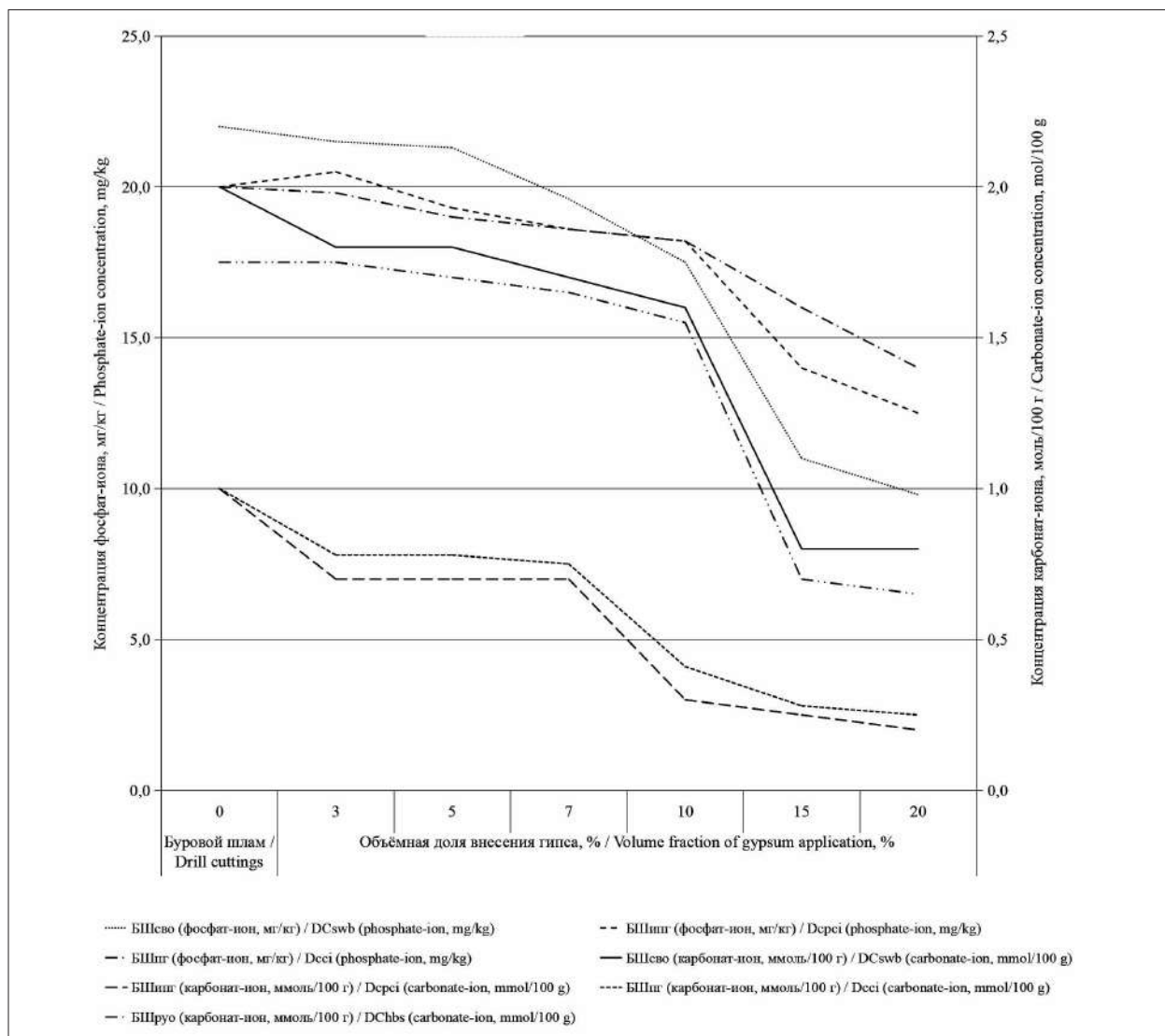


Рис. 1. Изменение концентрации фосфат-ионов и карбонат-ионов в буровом шлам при внесении гипса
 Fig. 1. Change in the concentration of phosphate ions and carbonate ions in drill cuttings when adding gypsum

Таблица 1 / Table 1

Величина плотного остатка в водной вытяжке бурового шлама и мелиорированных буровых шламов
 The amount of dense residue in the aqueous extract of drill cuttings and reclaimed drill cuttings

Объёмная доля внесения гипса в буровой шлам, % Volume fraction of gypsum added to drill cuttings, %	Величина плотного остатка водной вытяжки, % The amount of dense residue of the aqueous extract, %			
	БШ _{сво} / DC _{swb}	БШ _{пг} / DC _{pci}	БШ _{пг} / DC _{ci}	БШ _{роо} / DC _{hbs}
Буровой шлам (контроль) Drill cuttings (control)	2,48±0,17	1,08±0,08	1,99±0,14	2,23±0,16
Буровой шлам + гипс (97:3) Drill cuttings + gypsum (97:3)	1,01±0,07	0,44±0,03	0,81±0,06	0,90±0,06
Буровой шлам + гипс (95:5) Drill cuttings + gypsum (95:5)	0,92±0,09	0,40±0,03	0,74±0,05	0,83±0,06
Буровой шлам + гипс (93:7) Drill cuttings + gypsum (93:7)	0,86±0,09	0,37±0,03	0,69±0,05	0,77±0,05
Буровой шлам + гипс (90:10) Drill cuttings + gypsum (90:10)	0,73±0,07	0,32±0,02	0,58±0,04	0,65±0,05
Буровой шлам + гипс (85:15) Drill cuttings + gypsum (85:15)	0,68±0,07	0,30±0,02	0,54±0,04	0,61±0,04
Буровой шлам + гипс (80:20) Drill cuttings + gypsum (80:20)	0,53±0,05	0,23±0,02	0,43±0,03	0,48±0,03

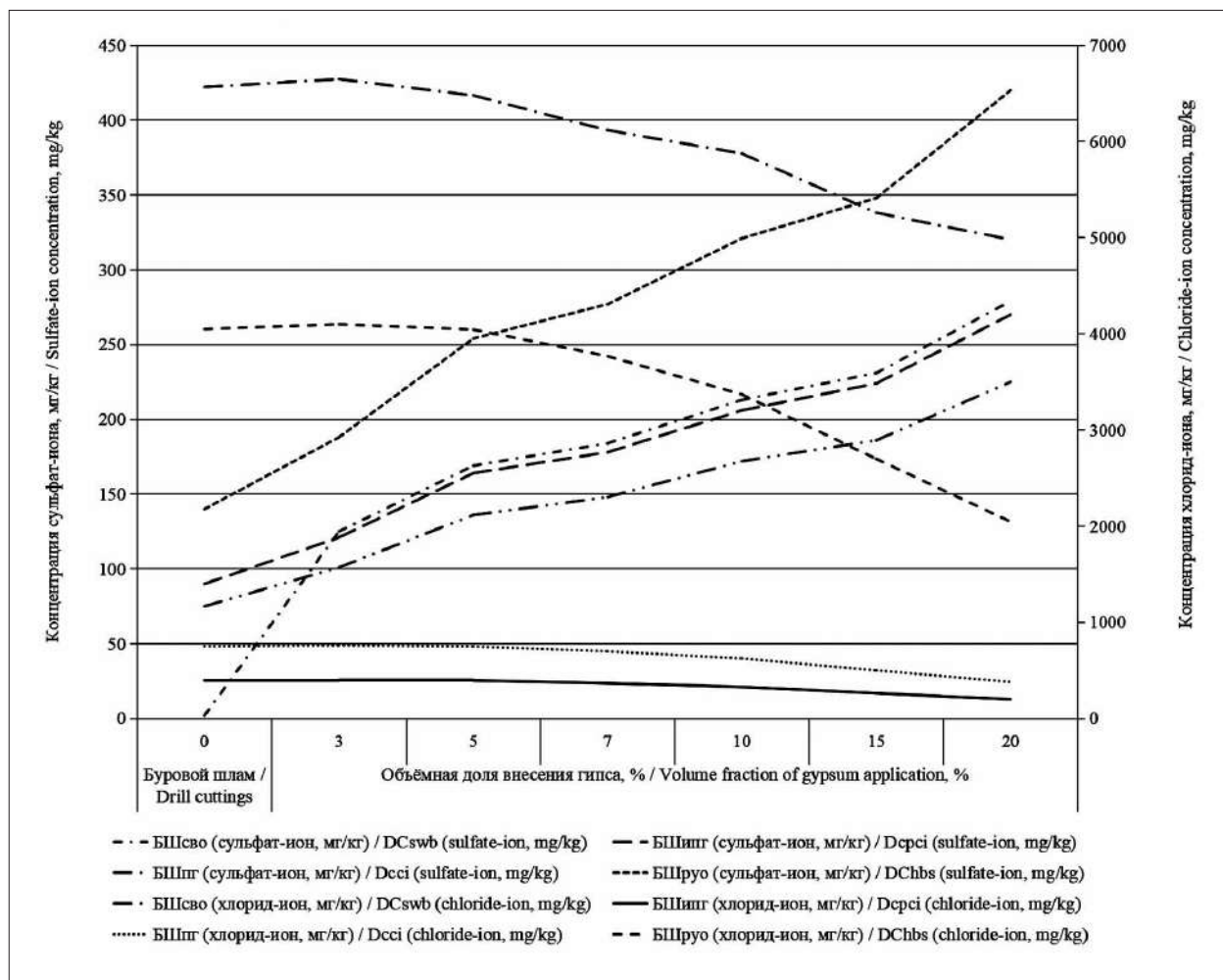


Рис. 2. Изменение концентрации сульфат-ионов и хлорид-ионов в буровом шлам при внесении гипса
 Fig. 2. Changes in the concentration of sulfate ions and chloride ions in drill cuttings when adding gypsum

Таблица 2 / Table 2

Значения коэффициента фильтрации в буровом шлам и мелиорированных буровых шлам
 Values of filtration coefficient in drill cuttings and reclaimed drill cuttings

Объёмная доля внесения гипса в буровой шлам, % / Volume fraction of gypsum added to drill cuttings, %	Коэффициент фильтрации, м/сут Filtration coefficient, m/day			
	БШ _{сво} DC _{swb}	БШ _{пг} DC _{pci}	БШ _{пруо} DC _{ci}	БШ _{пруо} DC _{lbs}
Буровой шлам (контроль) Drill cuttings (control)	0,0001	0,0002	0,0005	0,0004
Буровой шлам + гипс (97:3) Drill cuttings + gypsum (97:3)	0,00236	0,00328	0,00250	0,00187
Буровой шлам + гипс (95:5) Drill cuttings + gypsum (95:5)	0,00354	0,00427	0,00390	0,00190
Буровой шлам + гипс (93:7) Drill cuttings + gypsum (93:7)	0,00495	0,00555	0,00470	0,00271
Буровой шлам + гипс (90:10) Drill cuttings + gypsum (90:10)	0,00636	0,00698	0,00624	0,00330
Буровой шлам + гипс (85:15) Drill cuttings + gypsum (85:15)	0,00728	0,00788	0,00715	0,00411
Буровой шлам + гипс (80:20) Drill cuttings + gypsum (80:20)	0,00787	0,00859	0,00739	0,00587

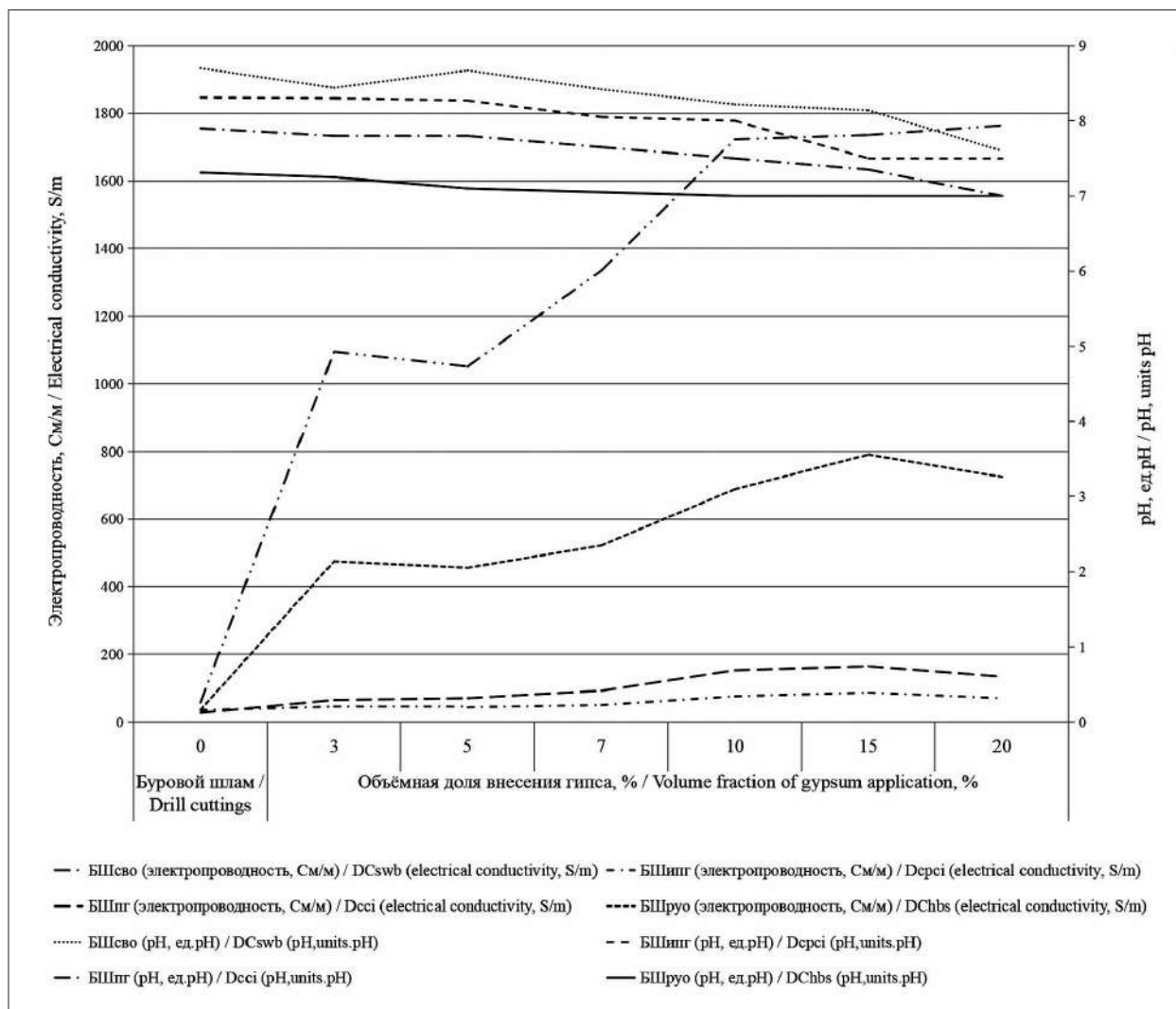


Рис. 3. Изменение электропроводности и водородного показателя в буровом шлеме при внесении гипса
 Fig. 3. Changes in electrical conductivity and pH in drill cuttings when adding gypsum

Изменения коэффициента фильтрации буровых шламов на углеводородной основе наблюдались при внесении 20% объемной доли гипса. Мелиорированный буровой шлам с коэффициентом фильтрации более 0,005 м/сут относился к слабопроницаемым грунтам.

Использование гипса увеличивает фильтрационную способность бурового шлама. В первоначальный период действия гипса происходит активное снижение содержания ионов натрия в поглощающем комплексе и насыщение его ионами кальция. При внесении гипса происходит существенное снижение величины плотного остатка, при этом происходит оструктурирование и улучшение фильтрационных свойств бурового шлама.

Илистая фракция представляет собой высокодисперсные частицы и является одной из причин негативных процессов в буровых шламах. Применение гипса позволяет увели-

чить содержание физического песка за счёт активной коагуляции коллоидов [23]. В буровых шламах содержание фракций физической глины составляет БШ_{сво} – 36,44%, БШ_{пг} – 38,15%, БШ_{рп} – 35,41%, что позволяет их отнести к суглинку среднему. В буровом шлеме на углеводородной основе частиц диаметром < 0,01 мм было 97,06%, шлам относился к глине тяжелой. В буровом шлеме содержание илистой фракции обусловлено выбуренной породой и используемым буровым раствором (табл. 3).

При внесении гипса в буровой шлам в объемной доле от 10 до 20% наблюдается переход градации гранулометрического состава из суглинка среднего до суглинка легкого в пробах бурового шлама (БШ_{сво}, БШ_{пг}, БШ_{рп}). Внесение гипса в объемной доле 15–20% способствовало максимальному снижению содержания илистой фракции

Таблица 3 / Table 3

Гранулометрический состав бурового шлама и мелиорированных буровых шламов
Granulometric composition of drill cuttings and reclaimed drill cuttings

Объёмная доля внесения гипса в буровой шлам, % Volume fraction of gypsum added to drill cuttings, %	БШ _{сво} / DC _{swb}		БШ _{нгр} / DC _{pci}		БШ _{нр} / DC _{ci}		БШ _{пыо} / DC _{hbs}	
	Диаметр частиц, мм / Particle diameter, mm							
	> 0,01	< 0,01	> 0,01	< 0,01	> 0,01	< 0,01	> 0,01	< 0,01
Буровой шлам (контроль) Drill cuttings (control)	63,56	36,44	61,85	38,15	64,59	35,41	2,94	97,06
Буровой шлам + гипс (97:3) Drill cuttings + gypsum (97:3)	66,60	33,40	64,81	35,19	64,75	35,25	5,59	94,41
Буровой шлам + гипс (95:5) Drill cuttings + gypsum (95:5)	68,87	31,13	65,30	34,70	64,90	35,10	8,19	91,81
Буровой шлам + гипс (93:7) Drill cuttings + gypsum (93:7)	69,95	30,05	68,14	31,86	67,60	32,40	9,09	90,91
Буровой шлам + гипс (90:10) Drill cuttings + gypsum (90:10)	70,24	29,76	71,70	28,30	70,55	29,45	11,09	88,91
Буровой шлам + гипс (85:15) Drill cuttings + gypsum (85:15)	72,35	27,65	73,94	26,06	71,85	28,15	21,79	78,21
Буровой шлам + гипс (80:20) Drill cuttings + gypsum (80:20)	72,97	27,03	75,44	24,56	72,39	27,61	23,89	76,11

Таблица 4 / Table 4

Значения коэффициента скорости растворения хлорид-ионов бурового шлама и мелиорированных буровых шламов / Values of the coefficient of dissolution rate of chloride ions of drill cuttings and reclaimed drill cuttings

Объёмная доля внесения гипса в буровой шлам, % Volume fraction of gypsum added to drill cuttings, %	Коэффициент скорости растворения, γ_2 1/сут Dissolution rate coefficient, γ_2 1/day.			
	БШ _{сво} / DC _{swb}	БШ _{нгр} / DC _{pci}	БШ _{нр} / DC _{ci}	БШ _{пыо} / DC _{hbs}
Буровой шлам + гипс (97:3) Drill cuttings + gypsum (97:3)	0,000065	0,001998	0,001667	0,000018
Буровой шлам + гипс (95:5) Drill cuttings + gypsum (95:5)	0,000474	0,003035	0,003224	0,000465
Буровой шлам + гипс (93:7) Drill cuttings + gypsum (93:7)	0,003391	0,003860	0,004518	0,001881
Буровой шлам + гипс (90:10) Drill cuttings + gypsum (90:10)	0,006711	0,011710	0,010467	0,005534
Буровой шлам + гипс (85:15) Drill cuttings + gypsum (85:15)	0,014498	0,026280	0,023843	0,013703
Буровой шлам + гипс (80:20) Drill cuttings + gypsum (80:20)	0,019028	0,042492	0,036556	0,029038

в буровом шламе на углеводородной основе до глины средней.

Важность прогнозирования нормы внесения гипса позволяет учитывать уровень снижения содержания водорастворимых солей в буровом шламе [24, 25].

В качестве начального условия принимается естественное распределение гипса по всей толще бурового шлама, концентрация хлорид-ионов выражается зависимостями вида:

$$c(x, t) = c_0(x), b_i(x, t) = b_{i0}(x), (i = 1, 2).$$

Функция $c(x, t)$ – концентрация водорастворимых солей в момент времени t (сут.) в точке x (м) в толще бурового шлама при внесении гипса в объёмной доле b_i .

В качестве фильтрующей воды использовали дистиллированную воду, в связи с тем, что концентрация хлорид-ионов не обнаружена, данный показатель в формуле не учитывался.

Коэффициент фильтрации $v(t)$ м/сут. – известная функция, высота слоя $x = 0,1$ м; $b_* = b_0, b_3, b_5 \dots b_{20}$ (норма внесения гипса $b_0 = 0\%$, $b_3 = 3\%$, $b_5 = 5\%$, $b_7 = 7\%$, $b_{10} = 10\%$, $b_{15} = 15\%$,

$b_{20} = 20\%$); $c_0(x, b_0)$, $c_3(x, b_3)$, $c_5(x, b_5)$, $c_7(x, b_7)$, $c_{10}(x, b_{10})$, $c_{15}(x, b_{15})$, $c_{20}(x, b_{20})$ – концентрация хлорид-ионов до и после внесения гипса, мг/кг. Коэффициент скорости растворения хлорид-ионов (γ_2 , 1/сут.) рассчитывается по формуле:

$$\gamma_2(v) = \sqrt{\frac{b_{0..20}}{b_*}} \cdot \left(\frac{c_0 - c_{3..20}}{c_0} \right) / \frac{dv}{dx}$$

Результаты расчётов коэффициента скорости растворения хлорид-ионов показывают зависимость полученных значений от объёмной доли внесения гипса (табл. 4). Внесение гипса способствовало увеличению скорости растворения, но необходимо учитывать, что на скорость растворения влияют исходные физические и химические характеристики бурового шлама (плотность, гранулометрический состав, содержание солей).

Заключение

Содержание водорастворимых солей в буровых шламах зависит от типа применяемого раствора, повышенные их концентрации оказывают негативное воздействие на почвенный покров, поверхностные и грунтовые воды. В процессе утилизации буровых шламов необходимо снижать токсический эффект водорастворимых солей путём внесения гипса.

В ходе экспериментальных исследований выявлены закономерности снижения содержания водорастворимых солей в буровых шламах с применением гипса. Изменение электропроводности подтверждает переход солей в растворимую форму и зависит от объёма внесения гипса. При внесении гипса происходит существенное снижение величины плотного остатка, при этом происходит структурирование и повышение фильтрационных свойств бурового шлама. Математическая модель прогноза растворения солей в буровом шламе позволяет учитывать неуправляемые факторы (плотность, гранулометрический состав, коэффициент фильтрации, содержание водорастворимых солей) и доказывает положительное влияние внесения гипса.

Одним из направлений применения утилизированных буровых шламов являются общестроительные земляные работы: планировочные работы, обратные засыпки (котлованов, карьерных выемок грунта, полостей рекультивируемых шламовых амбаров и временных шламонакопителей кустовых площадок), в том числе на этапах технической рекультивации и подготовки к ним.

Литература

1. Gaevaya E., Tarasova S., Bytsko A. The environmental impact of drilling sludge and ways of their utilization // *Journal of Ecological Engineering*. 2019. V. 20. No. 7. P. 26–30. doi: 10.12911/22998993/109764
2. Король В.В. Утилизация отходов бурения скважин // *Экология и промышленность России*. 2005. № 1. С. 40–42.
3. Малахова Ю.В., Осташ О.С., Мазлова Е.А. Экологические проблемы, связанные с содержанием государственных скважин на лицензионном участке недропользователя // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 8. С. 66–71. doi: 10.18412/1816-0395-2021-8-66-71
4. Чеботаев А.Н. Возможность утилизации бурового шлама Бованенковского месторождения в производстве строительных материалов // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2015. № 9. С. 26–29.
5. Плешакова Е.В., Беляков А.Ю. Использование различных приёмов биотестирования для оценки токсического действия на почву инвертно-эмульсионных буровых растворов и их дисперсионных сред // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2014. № 1. С. 38–43.
6. Гаева Е.В., Тарасова С.С., Солонина В.А. Разработка научных основ утилизации буровых отходов при бурении скважин в нефтяной отрасли. Тюмень: ТИУ, 2020. 160 с.
7. Петухова В.С., Скипин Л.Н., Митрофанов Н.Г. Возможности улучшения свойств бурового шлама для их рекультивации // *Вестник КрасГАУ*. 2012. № 1 (64). С. 28–31.
8. Скипин Л.Н., Храмцов Н.В., Гузеева С.А., Петухова В.С. Возможности рекультивации буровых шламов и солонцов с использованием фосфогипса // *Аграрный вестник Урала*. 2013. № 6 (112). С. 71–73.
9. Заличева И.Н., Волков И.В., Ганина В.С., Шустова Н.К. Зависимость экологической опасности буровых растворов от солёности акватории нефтедобычи // *Нефтегазовые технологии*. 2001. № 3. С. 35–38.
10. Скипин Л.Н., Скипин Д.Л., Петухова В.С., Кустышева И.Н. Эффективность влияния коагулянтов на физические свойства буровых шламов // *Вестник Кемеровского государственного университета*. 2015. № 4–3 (64). С. 88–92.
11. Скипин Л.Н., Петухова В.С., Третьяков П.Ю., Скипин Д.Л. Подбор мелиорантов для рекультивации буровых шламов // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2023. № 4 (313). С. 13–19. doi: 10.33285/2411-7013-2023-4(313)-13-19
12. Петухова В.С., Скипин Л.Н., Скипин Д.Л., Симакова Т.В. Результативность действия мелиорантов на буровых шламах // *Аграрный вестник Урала*. 2016. № 6 (148). С. 45–50.
13. Ибраева В.А., Сафаров А.Х. Биотехнологические методы обезвреживания буровых отходов //

Интеграция науки и высшего образования в области био- и органической химии и биотехнологии: материалы XI Всероссийской научной интернет-конференции. Уфа: УГНТУ, 2017. С. 106–108.

14. Скипин Л.Н., Скипин Д.Л., Петухова В.С., Бурлаенко В.З. Влияние коагулянтов и омагниченной воды для рассоления буровых шламов // Естественные и технические науки. 2022. № 6 (169). С. 72–77.

15. Тарасова С.С., Гаевая Е.В. Влияние содержания водорастворимых солей в буровых шламах на смертность гидробионтов (*Daphnia magna* Straus и *Chlorella vulgaris* Beijer) // Естественные и технические науки. 2021. № 7 (158). С. 81–84.

16. Ковалева Е.И., Гучок М.В., Ледовских С.С., Демин В.В. Аспекты вовлечения отходов бурения в процессы почвообразования // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 8. С. 20–25. doi: 10.18412/1816-0395-2019-08-20-25

17. Рудакова Л.В., Пичугин Е.А., Зильберман М.В., Зырянова Е.В. Влияние кислотного стабилизатора грунтов на кислотно-основные свойства буровых шламов // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 10. С. 29–33. doi: 10.18412/1816-0395-2019-10-29-33

18. Ягафарова Г.Г., Барахнина В.Б. Утилизация экологически опасных буровых отходов // Нефтегазовое дело. 2006. № 2. С. 48–61.

19. Сакаева Э.Х., Рудакова Л.В. Оценка биологической активности техногрунтов на основе буровых шламов для рекультивации нарушенных земель // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 192–197. doi: 10.25750/1995-4304-2020-4-192-197

20. Белявская О.Ш., Зимнухов М.А., Плотникова А.Е. Влияние коагулянтов на фильтрационную способность буровых шламов // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 9-ой международной научно-технической конференции. Омск: Омский государственный технический университет, 2019. С. 217–218.

21. Плотникова А.Е., Зимнухов М.А., Белявская О.Ш. Влияние магнитного поля на растворы солей в составе сточных вод буровых шламов севера Тюменской области // Вестник молодежной науки. 2019. № 2 (19). С. 17.

22. Плотникова А.Е., Зимнухов М.А., Белявская О.Ш. Определение коэффициента фильтрации бурового шлама с высокой концентрацией солей // Балтийский морской форум: материалы VII Международного Балтийского морского форума. В 6-ти томах. Калининград: Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет», 2019. Т. 1. С. 344–349.

23. Петухова В.С., Скипин Л.Н., Митрофанов Н.Г. Подбор коагулянтов для улучшения свойств буровых шламов // Ползуновский вестник. 2011. № 4–2. С. 180–181.

24. Микайылов Ф.Д. Прямые и обратные задачи модели солепереноса в условиях стационарного водно-солевого режима почвогрунтов // Пермский аграрный вестник. 2014. № 3 (7). С. 52–59.

25. Микайылов Ф.Д. Определение параметров модели солепереноса при промывках водонасыщенных поверхностно-засоленных почвогрунтов // Почвоведение. 2007. № 5. С. 599–609.

References

1. Gaevaya E., Tarasova S., Bytsko A. The environmental impact of drilling sludge and ways of their utilization // Journal of Ecological Engineering. 2019. V. 20. No. 7. P. 26–30. doi: 10.12911/22998993/109764

2. Korol V.V. Disposal of well drilling waste // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2005. No. 1. P. 40–42 (in Russian).

3. Malakhova Yu.V., Ostakh O.S., Mazlova E.A. Environmental problems associated with the maintenance of government wells in the subsoil user's licensed area // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2021. V. 25. No. 8. P. 66–71 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2021-8-66-71

4. Chebotaev A.N. Possibility of recycling drill cuttings from the Bovanenkovskoye field in the production of building materials // Stroitelstvo neftnyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. 2015. No. 9. P. 26–29 (in Russian).

5. Pleshakova E.V., Belyakov A.Yu. The use of various biotesting techniques to assess the toxic effect of invert emulsion drilling fluids and their dispersion media on soil // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie. 2014. No. 1. P. 38–43 (in Russian).

6. Gaevaya E.V., Tarasova S.S., Solonina V.A. Development of the scientific basis for the disposal of drilling waste when drilling wells in the oil industry. Tyumen: TIU, 2020. 160 p. (in Russian).

7. Petukhova V.S., Skipin L.N., Mitrofanov N.G. Possibilities for improving the properties of drill cuttings for their reclamation // Vestnik KrasGAU. 2012. No. 1 (64). P. 28–31 (in Russian).

8. Skipin L.N., Khramtsov N.V., Guzeeva S.A., Petukhova V.S. Possibilities for reclamation of drill cuttings and solonetztes using phosphogypsum // Agrarnyy vestnik Urala. 2013. No. 6 (112). P. 71–73 (in Russian).

9. Zalicheva I.N., Volkov I.V., Ganina V.S., Shustova N.K. Dependence of the environmental hazard of drilling fluids on the salinity of the oil production area // Neftegazovye tekhnologii. 2001. No. 3. P. 35–38 (in Russian).

10. Skipin L.N., Skipin D.L., Petukhova V.S., Kustysheva I.N. The effectiveness of the influence of coagulants on the physical properties of drill cuttings // Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. No. 4-3 (64). P. 88–92 (in Russian).

11. Skipin L.N., Petukhova V.S., Tretyakov P.Yu., Skipin D.L. Selection of ameliorants for drill cuttings rec-

lamation // Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse. 2023. No. 4 (313). P. 13–19 (in Russian). doi: 10.33285/2411-7013-2023-4(313)-13-19

12. Petukhova V.S., Skipin L.N., Skipin D.L., Simakova T.V. Effectiveness of ameliorants on drill cuttings // Agrarnyy vestnik Urala. 2016. No. 6 (148). P. 45–50 (in Russian).

13. Ibraeva V.A., Safarov A.Kh. Biotechnological methods for neutralizing drilling waste // Integratsiya nauki i vysshego obrazovaniya v oblasti bio- i organicheskoy khimii i biotekhnologii: materialy XI Vserossiyskoy nauchnoy internet-konferencii. Ufa: UGNTU, 2017. P. 106–108 (in Russian).

14. Skipin L.N., Skipin D.L., Petukhova V.S., Burlaenko V.Z. The influence of coagulants and magnetized water for desalinization of drill cuttings // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2022. No. 6 (169). P. 72–77 (in Russian).

15. Tarasova S.S., Gaeva E.V. The influence of the content of water-soluble salts in drill cuttings on the mortality of aquatic organisms (*Daphnia magna* Straus and *Chlorella vulgaris* Beijer) // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2021. No. 7 (158). P. 81–84 (in Russian).

16. Kovaleva E.I., Guchok M.V., Ledovskikh S.S., Demin V.V. Aspects of the involvement of drilling waste in soil formation processes // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2019. V. 23. No. 8. P. 20–25 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2019-08-20-25

17. Rudakova L.V., Pichugin E.A., Zilberman M.V., Zyryanova E.V. The influence of an acid soil stabilizer on the acid-base properties of drill cuttings // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2019. V. 23. No. 10. P. 29–33 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2019-10-29-33

18. Yagafarova G.G., Barakhnina V.B. Disposal of environmentally hazardous drilling waste // Neftegazovoe delo. 2006. No. 2. P. 48–61 (in Russian).

19. Sakaeva E.Kh., Rudakova L.V. Assessment of the biological activity of technosoils based on drill cuttings for the reclamation of disturbed lands // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 192–197 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-192-197

20. Belyavskaya O.Sh., Zimnukhov M.A., Plotnikova A.E. The influence of coagulants on the filtration capacity of drill cuttings // Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva: materialy 9-oy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2019. P. 217–218 (in Russian).

21. Plotnikova A.E., Zimnukhov M.A., Belyavskaya O.Sh. The influence of the magnetic field on salt solutions in the composition of wastewater from drill cuttings in the north of the Tyumen region // Vestnik molodezhnoy nauki. 2019. No. 2 (19). P. 17 (in Russian).

22. Plotnikova A.E., Zimnukhov M.A., Belyavskaya O.Sh. Determination of the filtration coefficient of drill cuttings with high salt concentrations // Baltiyskiy morskoy forum. Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma. V 6-ti tomakh. Kaliningrad: Baltiyskaya gosudarstvennaya akademiya rybopromyslovogo flota FGBOU VPO “Kaliningradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet”, 2019. V. 1. P. 344–349 (in Russian).

23. Petukhova V.S., Skipin L.N., Mitrofanov N.G. Selection of coagulants to improve the properties of drill cuttings // Polzunovskiy vestnik. 2011. No. 4-2. P. 180–181 (in Russian).

24. Mikayylov F.D. Direct and inverse problems of the salt transfer model under conditions of stationary water-salt regime of soils // Permskiy agrarnyy vestnik. 2014. No. 3 (7). P. 52–59 (in Russian).

25. Mikayylov F.D. Determination of salt transfer model parameters during leaching of water-saturated surface-saline soils // Pochvovedenie. 2007. No. 5. P. 599–609 (in Russian).