

УДК 631.48

## МАГНИЙ В ЗАСОЛЕННЫХ ГИПССОДЕРЖАЩИХ ПОЧВАХ РОССИИ

© 2023 г. Г. И. Черноусенко<sup>a</sup>, \* (ORCID: 0000-0001-6367-5839),  
Н. Б. Хитров<sup>a</sup>, \*\* (ORCID: 0000-0001-5151-5109), Е. И. Панкова<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: chergi@mail.ru

\*\*e-mail: khitrovn@gmail.com

Поступила в редакцию 12.01.2023 г.

После доработки 02.03.2023 г.

Принята к публикации 03.03.2023 г.

Статистический анализ 3802 образцов засоленных почв разных регионов России позволил обосновать наблюдения о более высокой доле магния в почвах, содержащих гипс по сравнению с засоленными почвами, не содержащими гипс. Гипс не является токсичной солью и его наличие не приводит к росту засоления. Увеличение степени засоления в основном связано с солями натрия и магния, при этом чаще доля натрия превышает долю магния. Статистически обосновано, что в исследованных засоленных почвах, не содержащих гипс, среди катионов в водной вытяжке (1 : 5) доминирует натрий при любой степени засоления. Появление гипса в профиле почвы сопровождается значительным увеличением доли магния. При слабой и средней степени засоления в горизонтах, содержащих гипс более 1%, по медиане, а также среднему арифметическому, верхнему квартилю и максимуму доля магния от суммы натрия и магния в водной вытяжке (1 : 5) часто составляет более 50%. Даже при сильной и очень сильной степени засоления доля магния в гипсодержащих горизонтах значительна и составляет по медиане 43 и 31% соответственно, что в 5.8–6.7 раз больше, чем доля магния в безгипсовых горизонтах такой же степени засоления.

**Ключевые слова:** гипс, химизм засоления, степень засоления, катионы, анионы, магний, натрий, водная вытяжка, Calcic Gypsic Chernozem, Calcic Gypsisol, Haplic Gypsisol

**DOI:** 10.31857/S0032180X23600026, **EDN:** VPHWGC

## ВВЕДЕНИЕ

Засоление является одним из ведущих факторов деградации почв, требующих постоянного изучения и контроля [19, 34, 39]. В засоленных почвах независимо от химизма засоления (хлоридного, сульфатного, содового) среди катионов в подавляющем большинстве случаев доминирует натрий, что было показано ранее [5, 39] и обосновано статистически [20]. Тем не менее, встречаются засоленные почвы, в которых среди катионов возрастает доля магния или кальция, а в ряде разрезов магний или кальций начинают доминировать [9, 10, 20, 22, 25, 29].

В почве магний представлен рядом минералов, выветривание которых и метаморфизация приводят к появлению магния в почвенном растворе [14, 19, 24]. Преобладающую часть валового запаса магния составляют силикаты и алюмосиликаты – пироксены, оливин, роговая обманка, серпентин и др. Эти минералы не растворимы в воде, но под действием органических кислот, углекислоты почвенного воздуха они постепенно выветриваются, и в почвенный раствор переходят простые соединения магния. Так, в каче-

стве удобрений используется дунит, основной частью которого является оливин – ортосиликат магния  $Mg_2SiO_4$  с примесью  $Fe_2SiO_4$  с содержанием  $MgO$  41–47%. При действии почвенных кислот происходит его разложение и переход магния в почвенный раствор [7]. В щелочных и нейтральных почвах этот процесс заторможен. Легче разлагаются карбонаты магния. Из карбонатов, чаще в почве по расчетам и экспериментам определяется несквегонит ( $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ ) [32], встречается доломит ( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ), в составе природных кристаллов магнезиальных кальцитов часто обнаруживают карбонат магния в виде так называемого твердого раствора (до 8–30 мол. %  $MgCO_3$ ) [38]; сульфаты, чаще, особенно в мокрых солончаках, представлены гептогидратом магния  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , он же эпсомит или “английская соль”, или двойной сульфатной солью астраханитом  $Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$ ; хлориды – бишофитом  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  (встречается очень редко из-за своей высокой растворимости и способности поглощать пары воды из воздуха) [19]. В почве магний может находиться в виде глинистого минерала водного алюмосиликата магния – палыгарскита

( $\text{MgAl}_2[\text{Si}_4\text{O}_{11}][\text{OH}]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), который нередко встречается вместе с гипсоносными породами, а также сепиолита ( $\text{Mg}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), велика доля магния в монтмориллоните ( $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,33}(\text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), а также в ряде других минералов.

В районах распространения гипсоносных пород, например, в Хакасии, часто встречаются малонатриевые солонцы с большой долей магния, называемые в литературе “магниевыми” солонцами [4]. Преобладание обменного магния над натрием зафиксировано и в солонцах Баргузинской котловины [18] и на о. Ольхон [8]. Большую степень карбонатности и загипсованности малонатриевых солонцов сульфатно-магниевого засоления отмечала Гончарова [3]. Именно высоким содержанием магния в почвообразующих породах, содержащих магнезиальные хлориты, серпентиниты  $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$  некоторые авторы объясняют его повышенное содержание в ППК [3, 23], отмечая, что при распаде натриевых минералов в ППК преобладает натрий, магниевых — магний [1]. В засоленных несолонцовых почвах Хакасии, сформированных на красноцветных породах девона, содержащих гипс, часто велика и доля магния. Содержание солей в почвообразующей породе достигает 2%, основную часть в которых занимают сульфаты магния [4]. Значительное содержание сульфатов кальция и магния было отмечено в почвах семиаридных районов Бразилии [34], а также в районах поступления минерализованных вод при добыче полезных ископаемых [35].

Работ, в которых обсуждается наличие магния в засоленных почвах, крайне мало. Как правило, представлена сопутствующая информация о концентрации магния в грунтовых, оросительных водах и в вытяжках из водонасыщенных почвенных паст при явном доминировании среди катионов ионов натрия в анализируемых пробах [27, 30, 31, 33, 37]. Чаше исследуют прикладные вопросы влияния сульфатно-магневых растворов на прочность цемента, бетона фундаментов строений, износ конструкций, фильтрацию и др. [28, 36, 40].

При преобладании магния отдельно выделяется гидрокарбонатно-магниевого типа химизма засоления, который встречается только в почвах слабой и средней степени засоления [2]. Обобщение материалов по засолению солончаков мерзлотных котловин Бурятии позволило констатировать, что в Муйской, Еравнинской, Тункинской котловинах незначительная щелочность в большой степени обусловлена гидрокарбонатом магния [20], что связано не только с магнезиальными породами, слагающими борта котловин, но и с процессами мерзлотной метаморфизации почвенных растворов, способствующей выпадению карбонатов кальция, повышению минерализации и доли магния в почвенных растворах.

Встречается не только гидрокарбонатно-магниевого засоления, но и сульфатно-натриево-магниевого, или сульфатно-магниево-натриевого, часто с гипсом. Подобные примеры приведены в работах по гажевым почвам Предбайкалья и Оренбургской области [22, 25], подобные почвы отмечены в Узбекистане и Казахстане [9, 10, 25], в Минусинской котловине и котловинах Тувы [20, 21].

Анализ водных вытяжек показывает, что в гажевых почвах при отсутствии засоления или при средней степени засоления магний преобладает над натрием, и даже при сильной степени засоления содержание натрия в гажевых почвах равно содержанию магния [22, 25]. В почвенных растворах с содержанием солей 3–4,5 г/л слабогипсоносных почв Джизакской подгорной равнины, а также слабозасоленных и даже сильнозасоленных орошаемых луговых почв сульфатного засоления Ферганской долины Узбекистана, согласно приведенным аналитическим данным [9, 10], среди токсичных катионов магний также преобладает над натрием. Преобладает магний и в грунтовых водах гидроморфных почв Ферганской долины [17]. Отложения легкорастворимых солей, гипса, известняков и доломитов в этих районах, происходило в период трансгрессии моря с триаса по палеоген включительно, лагуны, в которых выпали эвапориты, сохранились и в неогене [13]. При росте засоления в гажевых солончаках доля магния сокращается до 20–47%, но иногда также превышает долю натрия от их суммы, составляя 52–56% [10]. Преобладание в 3–4 раза содержания магния в водной вытяжке над натрием отмечено и в солончаке темном сульфатном гипссодержащем (разрез 1.11) в Татарстане [6]. Формирование почв на морских гипсоносных отложениях при подпитке сульфатно-хлоридными магниевонатриевыми грунтовыми водами в Прикаспии на западных ильменях приводит к сопоставимому содержанию магния в водных вытяжках даже солончаков [26].

Наличие подобных почв, позволило высказать гипотезу, о возможной связи наличия гипса и магния в засоленных почвах.

Цель работы — оценить вероятность и условия проявления относительного преобладания магния над натрием среди катионов легкорастворимых солей в засоленных горизонтах почв, содержащих гипс.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — ионы магния и натрия в составе легкорастворимых солей по данным водных вытяжек с соотношением почва : вода = 1 : 5 из засоленных почв России. Анализировали базу данных состава водных вытяжек 1 : 5 образцов почв, созданную в отделе генезиса и мелиорации засо-

ленных почв Почвенного института им. В.В. Докучаева на основе собственных данных, фондов Почвенного института им. В.В. Докучаева и литературных источников по засоленным почвам разных регионов России. База содержит экспериментальные данные о содержании  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  в водных вытяжках, различные расчетные показатели (общую сумму солей, сумму токсичных солей, содержание токсичных ионов и др.), оценки типа химизма и степени засоления в горизонте, а также pH и содержание гипса.

Выборка включала 3802 образца, в том числе 1384 незасоленных и от 532 до 675 образцов в каждой из четырех градаций степени засоления: слабой, средней, сильной и очень сильной. В выборке представлены все типы химизма по анионам и катионам. В 1814 образцах отмечается наличие гипса, в 1979 он отсутствует. В базе представлены разные почвы (солонцы, солончаки, каштановые засоленные, лугово-черноземные засоленные, аллювиальные засоленные и др.) из следующих регионов России: Астраханская, Волгоградская, Саратовская, Самарская, Воронежская, Ростовская, Иркутская, Читинская области, Ставропольский, Краснодарский, Красноярский, Приморский края, Республики Башкортостан, Бурятия, Дагестан, Калмыкия, Крым, Тува, Хакасия, Якутия. Наличие в выборке незасоленных горизонтов почв обусловлено использованием данных по всему профилю, включенных в базу данных почв.

Общее содержание гипса определяли химическим методом по Хитрову, содержание легкорастворимых солей в стандартной водной вытяжке с соотношением почва : вода 1 : 5 [16].

Количество гипса, дополнительно растворившегося из твердой фазы при производстве водной вытяжки 1 : 5, рассчитывали в виде гипотетического сульфата кальция в водной вытяжке без учета молекул воды, входящих в состав кристалла гипса. Далее по тексту будем условно называть его “расчетный растворившийся гипс” и обозначать CSG (calculated soluble gypsum), выражая в процентах от массы почвы. Использовали следующий алгоритм:

1) если  $(\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-) \leq 0$ , то  $\text{CSG} = 0$ ,

2) если  $(\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-) > 0$  и  $(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-) \geq \text{Ca}^{2+}$ , то

$$\text{CSG} (\%) = (\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-) \times 0.068,$$

3) если  $(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-) < \text{Ca}^{2+}$ , то  $\text{CSG} (\%) = \text{SO}_4^{2-} \times 0.068$ ,

где  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  — общее содержание указанных ионов в водной вытяжке (1 : 5), смоль(экв)/кг;

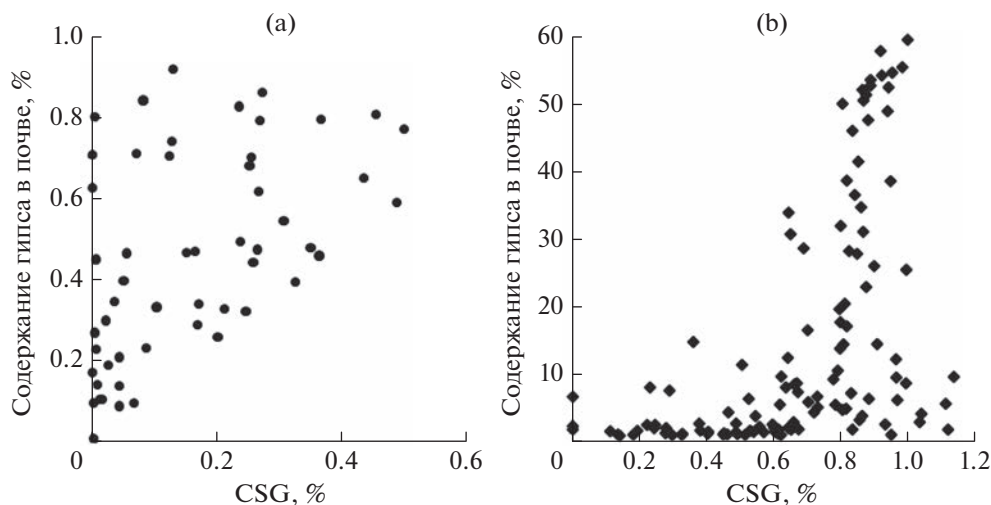
0.068 — коэффициент пересчета единиц из смоль(экв)/кг в % от массы почвы.

Первый пункт алгоритма реализуется в условиях отсутствия гипса в горизонте независимо от степени и химизма засоления. При наличии гипса в горизонте и хлорида кальция в водной вытяжке выполняется соотношение третьего пункта. В остальных случаях при любом нейтральном типе химизма засоления по анионам расчет гипотетического сульфата кальция в водной вытяжке выполняется по второму пункту.

Полученное расчетное значение сульфата кальция по данным водной вытяжки 1 : 5 является заниженной оценкой реально растворившегося в водной вытяжке гипса из твердой фазы по следующим причинам. При приготовлении водной вытяжки гипс из твердой фазы, растворяясь в добавленной дистиллированной воде, приводит к увеличению концентрации ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  на фоне уменьшающейся концентрации ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  по сравнению с их концентрацией в почвенном растворе. Это изменяет соотношение между катионами в растворе водной вытяжки в пользу ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , которые вытесняют часть обменных  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в раствор. Равновесие реакции обмена катионов между почвенным поглощающим комплексом (ППК) и раствором при этом смещается в сторону дополнительного вытеснения обменных  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  и поглощения в ППК  $\text{Ca}^{2+}$  за счет дополнительного растворения гипса из твердой фазы в связи с частичным удалением  $\text{Ca}^{2+}$  из раствора в ППК.

После установления равновесия в водной вытяжке 1 : 5 возникает следующее соотношение ионов. Концентрации ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  являются результатом сложения количества этих ионов в составе легкорастворимых солей почвенного раствора (при влажности меньше полной влагоемкости) и части обменных  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , вытесненных в раствор водной вытяжки за счет ионов  $\text{Ca}^{2+}$  растворившегося гипса из твердой фазы. Формально при расчете гипотетических солей по данным водной вытяжки часть вытесненных в раствор обменных  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  связывается с сульфатами растворившегося гипса, но при анализе данных водной вытяжки рассматриваются как легкорастворимые (“токсичные”) соли. В результате полученное расчетное значение растворившегося сульфата кальция по данным водной вытяжки 1 : 5 занижено на величину, эквивалентную поглотившемуся  $\text{Ca}^{2+}$  в реакциях катионного обмена. А содержание  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  завышено на эту же величину.

Для статистического анализа горизонты почв, представленные в аналитической базе данных состава водной вытяжки, были разделены по двум критериям: (1) по величине расчетного содержания сульфата кальция в водной вытяжке



**Рис. 1.** Соотношение между расчетным содержанием гипотетического  $\text{CaSO}_4$  по результатам водной вытяжки 1 : 5 (CSG) и общего содержания гипса в почве; образцы с общим содержанием гипса: а – <1%, б – >1%.

(1 : 5) на безгипсовые ( $\text{CSG} = 0$ ), малогипсовые ( $\text{CSG} 0.001\text{--}0.3\%$ ) и гипсодержащие ( $\text{CSG} > 0.3\%$ ) и (2) по степени засоления – незасоленные, слабо-, средне-, сильно- и очень сильно засоленные. В каждой из групп были рассчитаны непараметрические статистические показатели, а также построены гистограммы, показывающие наиболее часто встречающиеся варианты горизонтов с разной долей магния или натрия от их суммы в водной вытяжке.

Тип химизма засоления по анионам и катионам определяли по [2, 5, 19]. В базе данных оценка степени и химизма засоления генерируются автоматически в Excel по алгоритмам, реализующим указанные выше правила.

Группировка по величине CSG сделана в связи с ограниченным количеством данных об общем содержании гипса в базе данных. Связь величины CSG, характеризующей растворившуюся часть гипса в водной вытяжке, и общего содержания гипса представлена на рис. 1. В 53 образцах почв из Бурятии, Красноярского края, Тувы и Хакасии с общим содержанием гипса в горизонте менее 1% величина CSG не превышает 0.5% (рис. 1а). При этом доля растворившегося гипса от его содержания в горизонте варьирует от 0 до 83% с медианой 31%, нижним и верхним квартилями 10 и 56%. В другой выборке из 119 образцов из тех же регионов общее содержание гипса в горизонте изменяется от 1 до 59.5% (рис. 1б) с медианой 6.2%, нижним и верхним квартилями 1.9 и 21%. Величина CSG варьирует от 0 до 1.14%. При этом степень насыщенности водных вытяжек по гипсу составляла от 60 до 90%, что находится в хорошем согласии с оценками, имеющимися в литературе [15]. Степень насыщенности по гипсу рассчитывали по авторской компьютерной программе Ас-

тивн, реализующей модель ионных пар в растворе, аналогичную программе Libra [11]. Значения CSG менее 0.3–0.5% в образцах, содержащих более 1% гипса в твердой фазе, могут быть результатом частичной блокировки зерен гипса пленками карбоната кальция.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Непараметрические показатели статистических распределений долей магния и натрия от суммы токсичных катионов в водной вытяжке в горизонтах разной степени засоления и с разным содержанием гипса представлены в табл. 1. В незасоленных, слабо- и средnezасоленных горизонтах с  $\text{CSG} > 0.3\%$  доля магния превышает долю натрия и составляет по медиане 76, 59 и 63% соответственно. Доля магния выше доли натрия при такой степени засоления гипсодержащих горизонтов также по другим статистическим показателям: среднеарифметическому, минимуму, максимуму, нижнему и верхнему квартилю значений. Но надо отметить, что при слабой и средней степени засоления встречаются гипсодержащие горизонты, в которых доля натрия больше доли магния, но их значительно меньше. Возрастание засоления до сильной и очень сильной степени в горизонтах с  $\text{CSG} > 0.3\%$  изменяет картину, натрий начинает преобладать над магнием, хотя доля последнего остается достаточно высокой – 43% при сильной и 31% при очень сильной степени засоления с гипсом. Тогда как при отсутствии гипса, доля магния среди токсичных катионов (по медиане) значительно ниже при любой степени засоления: 16.9, 9.0, 7.4 и 4.6% при слабой, средней, сильной и очень сильной степени засоления соответственно (табл. 1). В горизонтах с не-

**Таблица 1.** Статистический анализ доли магния и натрия от их суммы в водной вытяжке в горизонтах разной степени засоления и содержания гипса

Условное название группы образцов	Статистический показатель	CaSO <sub>4</sub> *	Степень засоления												
			незасоленный		слабая		средняя		сильная		очень сильная				
			Mg	Na	Mg	Na	Mg	Na	Mg	Na	Mg	Na			
Безгипсовые	<i>n</i>	1970	817	817	398	398	317	317	199	199	199	239	239	239	239
	Минимум	0	0	0	0	0	0	3.7	0	0	12.8	0	0	24.6	24.6
	Нижний квартиль	0	18.7	34	67.8	4.5	67.8	81.6	3.25	3.25	87.6	1.8	1.8	87.2	87.2
	Медиана	0	37.5	61.4	83.1	9.0	83.1	91.0	7.4	7.4	92.6	4.6	4.6	95.4	95.4
	Верхний квартиль	0	62.5	80.4	92.4	18.3	92.4	95.5	12.4	12.4	96.8	12.8	12.8	98.2	98.2
	Максимум	0	100	100	100	96.3	100	100	87.2	87.2	100	75.4	75.4	100	100
	Среднее	0	41.8	56.6	76.0	15.6	76.0	84.3	12.0	12.0	88.6	10.6	10.6	89.4	89.4
Стандартное отклонение	0	28.9	29.	23.1	23.0	18.8	18.9	14.2	14.2	14.5	14.1	14.1	14.1	14.1	
Малогипсовые	<i>n</i>	1297	552	552	157	157	186	186	264	264	264	138	138	138	
	Минимум	0.001	0	0	0	0	1.1	0	0	0	1.6	0	0	1.2	
	Нижний квартиль	0.01	27.8	28.8	47.9	21.4	47.9	55.4	13.0	13.0	63.7	10.1	10.1	70.9	
	Медиана	0.03	46.1	50.0	65.3	33.0	65.3	71.9	21.5	21.5	77.0	17.4	17.4	81.7	
	Верхний квартиль	0.1	66.7	70.7	77.2	47.4	77.2	83.9	33.5	33.5	86.5	26.2	26.2	89.9	
	Максимум	0.299	100	100	100	100	100	98.9	96.1	96.1	100	98.8	98.8	100	
	Среднее	0.07	47.5	49.1	61.9	35.3	61.9	67.7	24.9	24.9	73.2	20.9	20.9	77.4	
Стандартное отклонение	0.08	26.5	26.8	20.5	20.2	20.2	22.2	17.8	17.8	19.4	16.3	16.3	18.3		
Гипсодержащие	<i>n</i>	504	35	35	36	36	79	79	216	216	216	169	169	169	
	Минимум	0.30	12.1	1.0	11.9	33.0	11.9	4.0	2.8	2.8	8.2	1.0	1.0	0.2	
	Нижний квартиль	0.46	59.4	15.4	30.5	49.6	30.5	22.2	28.7	28.7	45.4	22.1	22.1	56.5	
	Медиана	0.75	76.1	23.9	40.5	59.3	40.5	36.8	43.1	43.1	56.9	31.1	31.1	68.4	
	Верхний квартиль	0.81	83.2	39.7	48.8	69.6	48.8	53.0	54.1	54.1	71.1	42.3	42.3	77.8	
	Максимум	1.14	99	87.9	59.4	88.1	59.4	90.5	91.8	91.8	97.2	99.8	99.8	99	
	Среднее	0.66	69.9	28.9	38.9	59.9	38.9	37.8	41.8	41.8	57.7	33.5	33.5	65.6	
Стандартное отклонение	0.24	20.2	20.9	14.4	14.4	19.2	19.2	17.4	17.4	17.6	19.7	19.7	20.2		

\* Гипотетическое расчетное содержание растворенного CaSO<sub>4</sub> по данным водной вытяжки 1 : 5.

значительным содержанием растворенного гипса картина промежуточная — доля магния среди катионов по медиане составляет 33, 28, 22 и 17.4 при слабой, средней, сильной и очень сильной степени засоления соответственно, т.е. она в 2–3 раза выше, чем в безгипсовых горизонтах.

Более наглядно эти выводы демонстрируют гистограммы (рис. 2–5).

На рис. 2–4 приведены гистограммы распределения горизонтов почв с разной долей участия магния и натрия при разной степени засоления и с разным содержанием гипса.

При нулевом значении расчетного растворенного гипса горизонты засоленных почв с преобладанием натрия (50–100% от суммы катионов) наиболее часто встречаются при любой степени засоления, составляя от 88 до 97.5% всей выборки, даже в незасоленных горизонтах 62% образцов с преобладанием натрия и лишь 35% с преобладанием магния. Распределение магния имеет выраженную тенденцию. Чем сильнее засоление в безгипсовых горизонтах почв, тем чаще наблюдается более низкая доля магния от суммы натрия и магния. При росте степени засоления наблюдается сдвиг максимума дифференциального распределения доли магния влево гистограммы в сторону меньших значений. Следует обратить внимание, что при любой степени засоления встречаются образцы с долей магния более 50% от суммы токсичных катионов. Преобладающими типами химизма засоления почв, не содержащих гипс, являются щелочные: содово-сульфатный (26.3% от выборки), хлоридно-содовый, сульфатно-содовый, сульфатный с токсичной щелочностью, содовый (9.5–13% каждого типа химизма). Меньше всего (0.3–0.5% от выборки) приходится на хлоридный, хлоридно-сульфатный, сульфатно-хлоридный и гидрокарбонатный типы химизма засоления.

Совсем другую картину демонстрирует рис. 3, на котором показано распределение доли магния и натрия в составе катионов в водной вытяжке из гипсодержащих горизонтов с содержанием гипса более 1%. В незасоленных, слабо- и среднезасоленных гипсодержащих горизонтах магний среди катионов чаще доминирует над натрием, составляя 71–83% от выборки, хотя иногда встречаются случаи, когда доля натрия больше доли магния. Рост степени засоления до сильной и очень сильной несколько изменяет распределение, начинает доминировать натрий (64–81%), хотя доля магния остается высокой (17–30%). Это закономерно, так как засоление чаще всего связано с катионами натрия, поэтому, чем выше степень засоления, тем чаще доминируют натриевые соли. Видно, что в целом при любой степени засоления наблюдается сдвиг максимума дифференциального распределения доли магния вправо

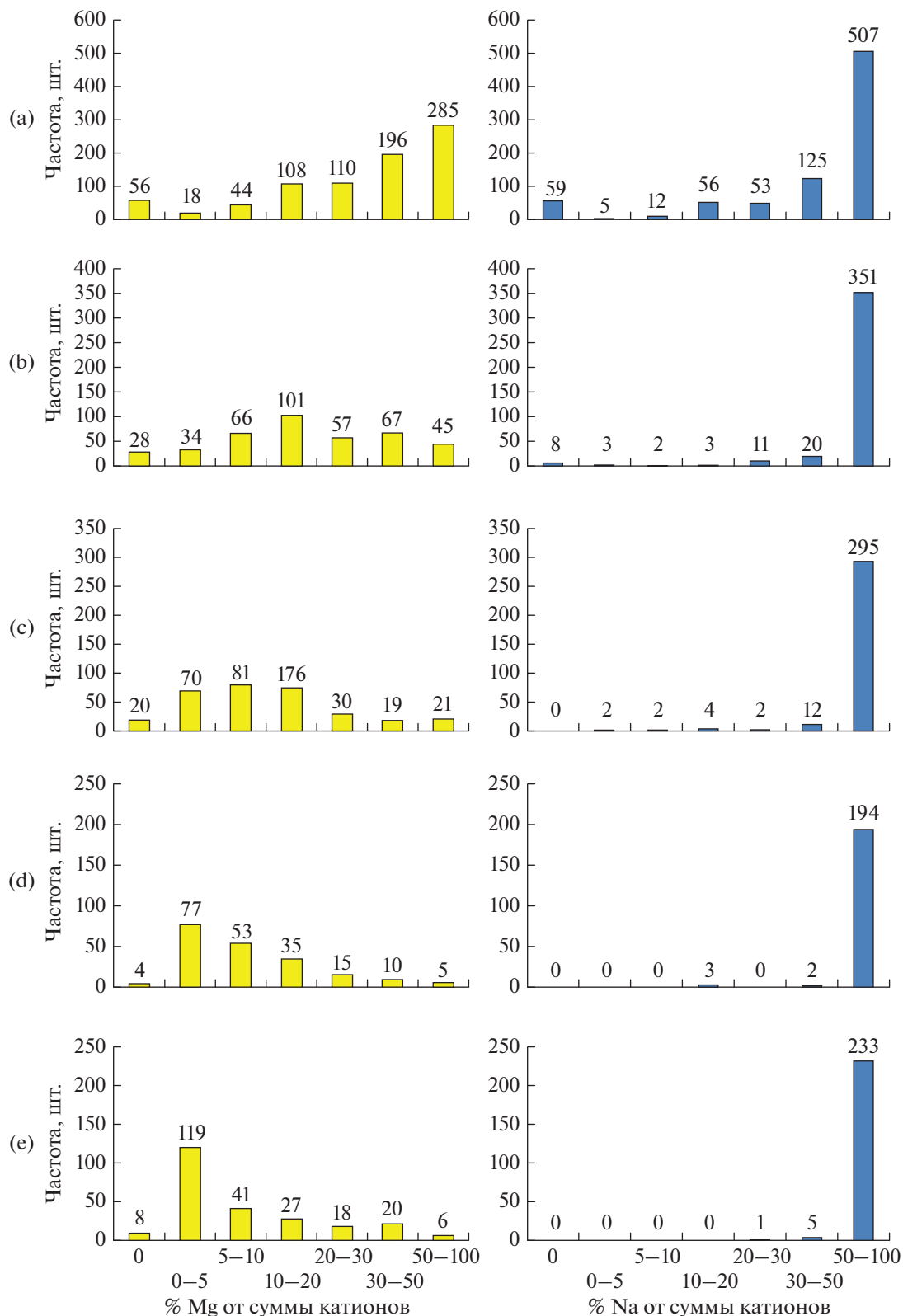
в сторону больших значений, в отличие от засоленных горизонтов без гипса. Химизм засоления этих горизонтов в основном сульфатный с гипсом (56.6% от выборки), в два раза реже встречается хлоридно-сульфатный химизм засоления с гипсом (23.4%), еще реже сульфатно-хлоридный с гипсом (12.2%) и хлоридный с гипсом (7.7%).

Промежуточная картина распределения наблюдается при появлении небольшого количества расчетного растворенного гипса (рис. 4). Появление в водной вытяжке некоторого (0.001–0.3%) количества сульфата кальция, который является лишь при наличии гипса в твердой фазе почвы, изменяет картину распределения доли магния и натрия в водной вытяжке 1 : 5 из почвы, но незначительно по сравнению с горизонтами без гипса. При доминировании натрия в незасоленных и засоленных горизонтах (более 50% от суммы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$ ), доля магния выше, от 5–8% в сильно и очень сильно засоленных горизонтах до 16–43% в слабо-, средне- и незасоленных горизонтах, что в целом выше чем в почвах, в которых расчетный гипс не фиксируется — 2.5–35% от выборки (рис. 2, 4). Следовательно, если в безгипсовых горизонтах сдвиг максимума дифференциального распределения доли магния был влево, в сторону меньших значений, то при появлении даже незначительного количества гипса, максимум распределения расположен в центре гистограммы или сдвигается в сторону больших значений. При слабой и средней степени засоления чаще встречаются горизонты с содержанием магния 30–50%, а не 5–20% как в безгипсовых почвах. Для малогипсоносных горизонтов преобладающими типом засоления является хлоридно-сульфатный (33.4%) и сульфатный (31.1%), меньше образцов сульфатно-хлоридного засоления (19.5%) и хлоридного (15.9%).

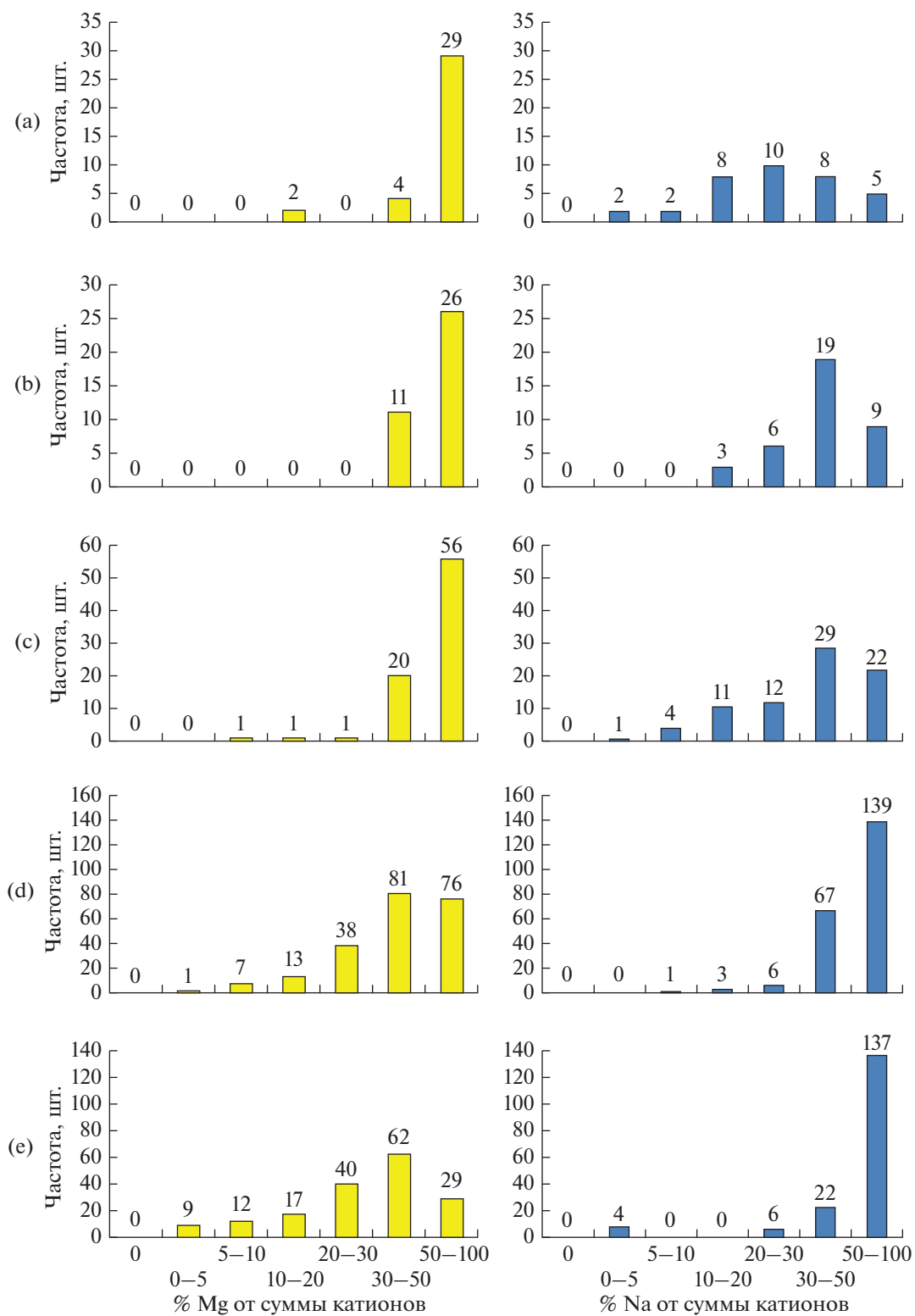
Наиболее наглядно связь содержания магния со степенью засоления почв и наличием гипса демонстрирует рис. 5. На нем приведены только горизонты с преобладающей долей (более 50%) магния или натрия.

Сначала рассмотрим тенденции в зависимости от степени засоления в пределах одной группы по содержанию гипса. В безгипсовых почвах и горизонтах с незначительным содержанием гипса при любой степени засоления встречаемость образцов с преобладанием натрия больше, чем встречаемость образцов с преобладанием магния. В незасоленных горизонтах частоты высоких долей натрия и магния относительно близки. С ростом степени засоления встречаемость случаев с преобладающей долей натрия увеличивается, а магния уменьшается.

Иная картина в горизонтах почв с высоким содержанием гипса ( $\text{CSG} > 0.3\%$ ). Встречаемость образцов с преобладанием магния над натрием

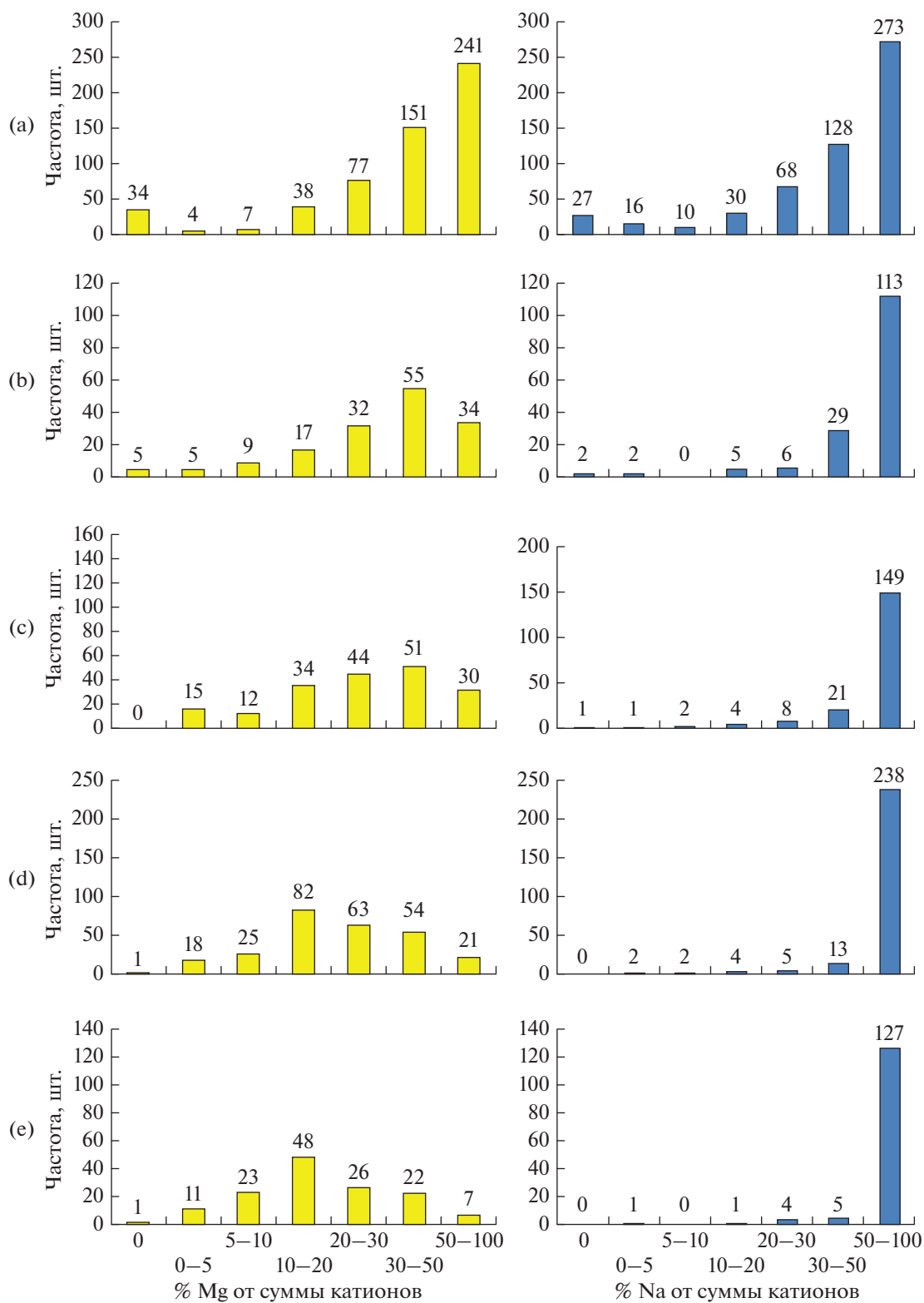


**Рис. 2.** Частота встречаемости доли магния и натрия от суммы токсичных катионов и степени засоления в водных вытяжках безгипсовых горизонтов засоленных почв. Степень засоления: а – нет засоления; б – слабая; в – средняя; д – сильная; е – очень сильная.

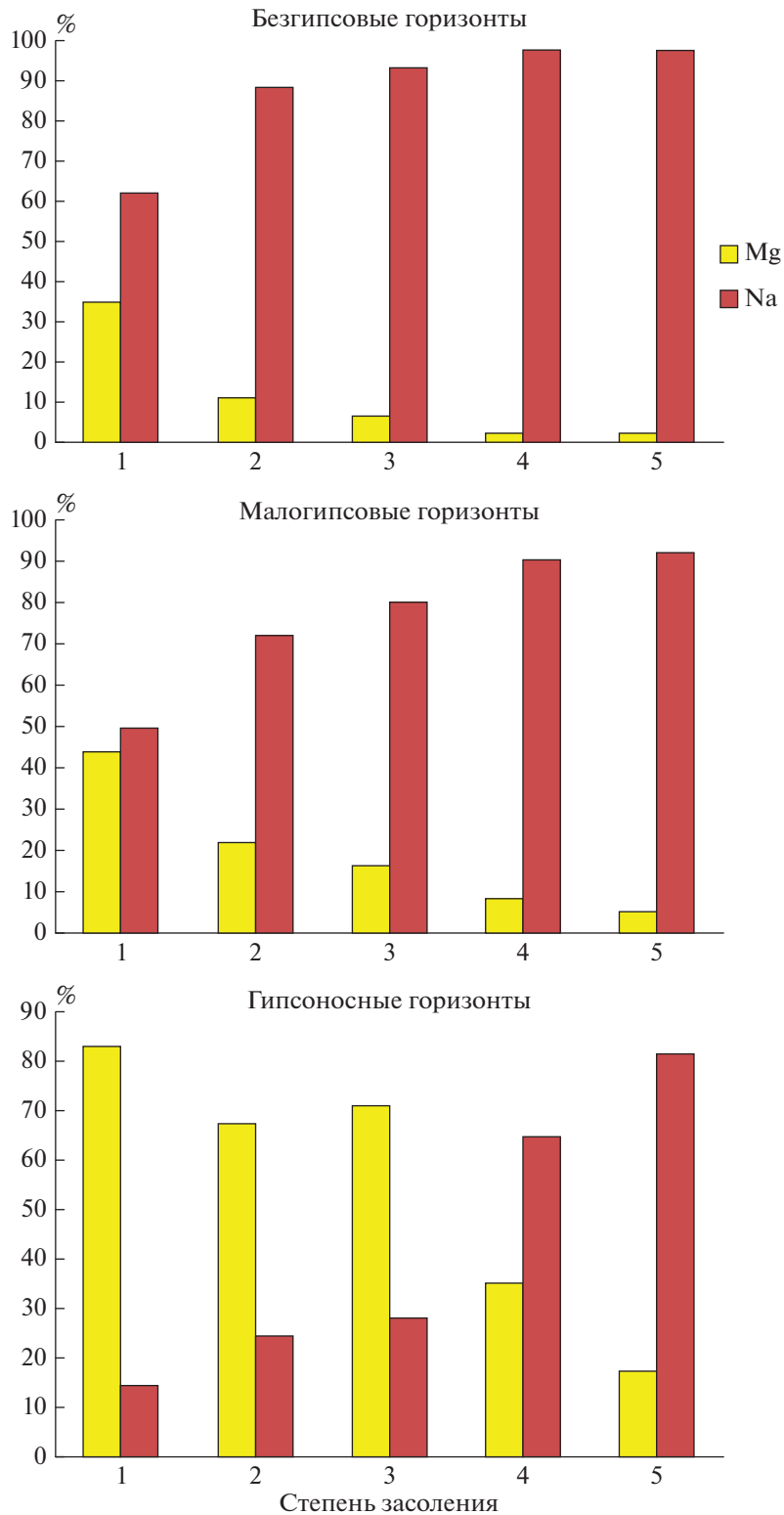


**Рис. 3.** Частота встречаемости доли натрия и магния от суммы токсичных катионов и степени засоления в водных вытяжках горизонтов с гипсом >1%. Степень засоления: а – нет засоления; б – слабая; в – средняя; д – сильная; е – очень сильная.





**Рис. 4.** Частота встречаемости доли натрия и магния от суммы токсичных катионов и степени засоления в водных вытяжках горизонтов засоленных почв, содержащих незначительное количество гипса, согласно расчетам по данным водных вытяжек. Степень засоления: а – нет засоления; б – слабая; с – средняя; d – сильная; e – очень сильная.



**Рис. 5.** Встречаемость образцов почв с разным содержанием гипса и степенью засоления, в которых среди токсичных катионов преобладает >50% магний или натрия. Степень засоления: 1 – нет засоления, 2 – слабая, 3 – средняя, 4 – сильная, 5 – очень сильная.

**Таблица 2.** Частота встречаемости разных типов химизма по катионам в горизонтах в зависимости от степени засоления и содержания гипса в водной вытяжке

Группа	Степень засоления	Частота встречаемости (шт./% от суммы) для типов химизма по катионам					
		Na	Mg–Na	Na–Mg	Mg	другие типы по катионам	сумма
CSG = 0	Незасоленный	207/26	299/37	79/10	210/26	3/0.4	798/100
	Слабая	227/53	124/29	10/2	67/16	0/0	428/100
	Средняя	246/78	49/15	5/2	16/5	1/0.3	317/100
	Сильная	168/84	25/13	1/1	4/2	1/0.5	199/100
	Очень сильная	195/82	36/15	3/1	3/1	0/0	237/100
0 < CSG < 0.3%	Незасоленный	69/13	202/37	64/12	179/32	37/6.7	551/100
	Слабая	33/21	80/51	21/13	16/10	7/4.5	157/100
	Средняя	60/32	92/49	15/8	14/8	5/2.7	186/100
	Сильная	122/46	112/43	7/3	13/5	9/3.4	263/100
	Очень сильная	81/58	47/34	2/1	5/4	4/2.9	139/100
CSG > 0.3%	Незасоленный	2/6	3/9	4/11	25/71	1/2.9	35/100
	Слабая	0/0	9/24	10/27	17/46	1/2.7	37/100
	Средняя	2/3	20/26	12/16	43/56	0/0	77/100
	Сильная	17/8	119/56	45/21	31/15	1/0.5	213/100
	Очень сильная	36/23	93/60	10/6	14/9	3/1.9	156/100

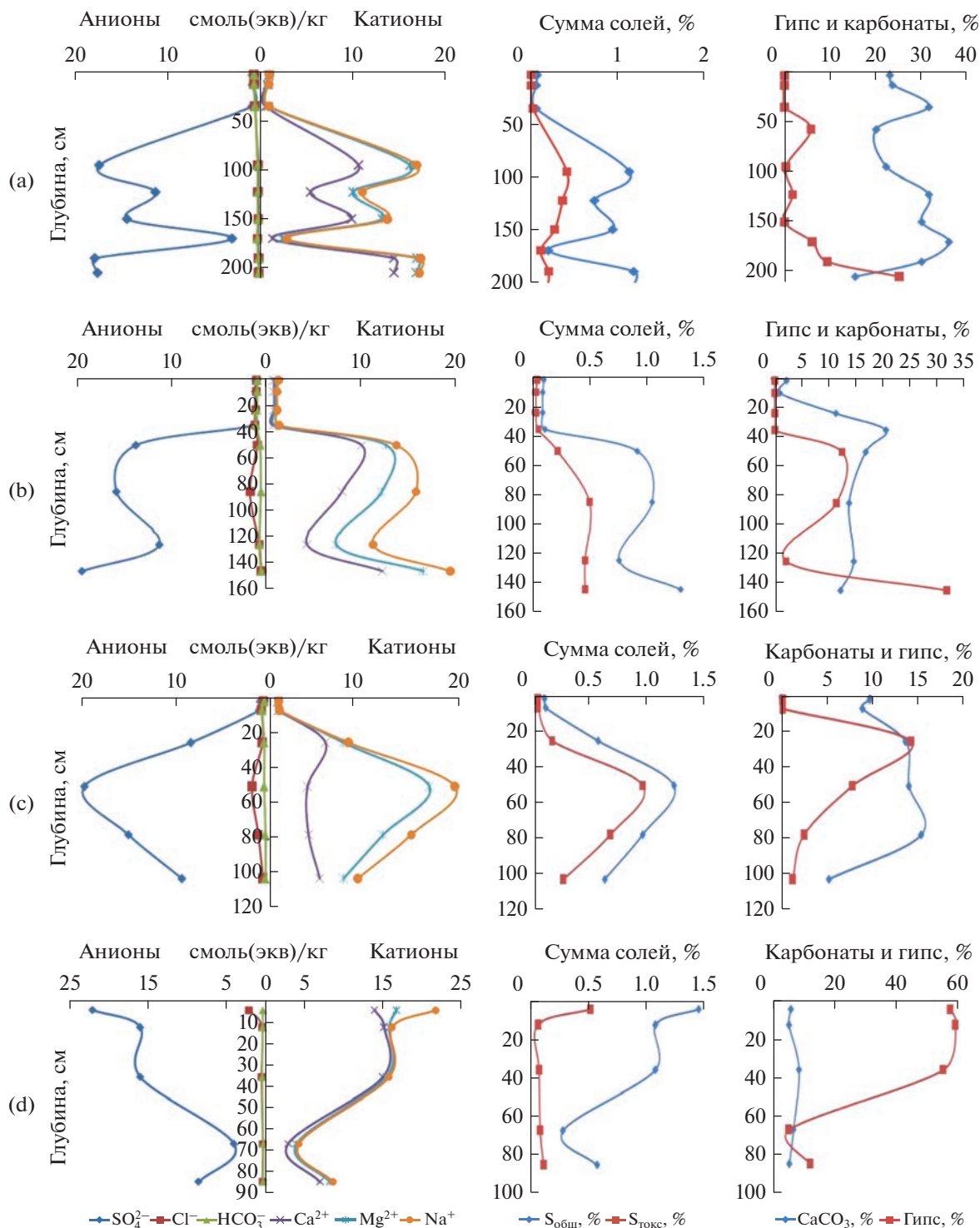
Примечание. Типы химизма по катионам: Na – натриевый, Mg–Na – магниевно-натриевый, Na–Mg – натриево-магниевый, Mg – магниевый, другие типы – кальциевый и разные смешанные с близкой долей трех катионов (Ca, Mg, Na). Критерии выделения по [19, с. 431].

больше в незасоленных, слабо- и средnezасоленных горизонтах. В сильно- и очень сильно засоленных горизонтах наблюдается картина, схожая с безгипсовыми и малогипсовыми горизонтами: частота случаев с высокой долей натрия больше, чем частота случаев с высокой долей магния.

Теперь анализ информации рис. 5 проведем в другом направлении: влияние содержания гипса при условии одинаковой степени засоления. Появление небольшого количества гипса приводит к увеличению в 1.3–2.7 раза частоты образцов с высокой долей магния во всех группах разной степени засоления. В горизонтах с высоким содержанием гипса по сравнению с малогипсовыми прослеживается тенденция более сильного увеличения в 2–4.4 раза. Если сравнивать горизонты с высоким содержанием гипса с безгипсовыми, то общее увеличение составляет от 2.4 в незасоленных до 5–12 раз в засоленных образцах.

При использовании качественных категорий в исследованной выборке наиболее часто встреча-

ется натриевый (1465 образцов или 38.6% от объема выборки) и магниевно-натриевый (1310 образцов или 34.5%) типы химизма засоления по катионам. Магниевый (657 образцов или 17.3%) и натриево-магниевый (288 образцов или 7.6%) типы встречаются реже в 2–4 раза. Другие типы химизма по катионам составляют вместе менее 2% выборки, они были исключены из анализа. Частота встречаемости разных типов химизма по катионам в горизонтах в зависимости от степени засоления и содержания гипса в водной вытяжке представлены в табл. 2. Можно отметить следующие тенденции. Во-первых, если относительную частоту выразить в процентах от числа образцов в группе по степени засоления и величине CSG, то наблюдается увеличение встречаемости магниевых типов химизма при слабой и средней степени засоления в группе CSG > 0.3%. Даже при сильной степени засоления чисто натриевого типа засоления в гипсодержащих горизонтах меньше, чем магниевых или натриево-магниевых, преобладает



**Рис. 6.** Солевые профили, общая сумма солей (%), сумма токсичных солей (%), содержание карбонатов и гипса (%) в гипсодержащих засоленных почвах разного гидроморфизма. Разрезы: а – 40Х-12 Чюсч сульфатный с гипсом средней степени засоления на элювии плотных гипсов. Хакасия N 53.522 E 90.9327, 324 м над ур. м.; б – 1Т-17 Чюсч сульфатно-магнийевый. Тува, Турано-Уюкская котловина N 52.07287 E 93.3726, 833 м над ур. м.; с – 6Т-17 Буряя лугово-пустынно-степная солончаковатая. Тува, Убсунурская котловина, N 50.6732, E 93.2118, 783 м над ур. м.; д – 4Т-05 Луговая солончаковатая. Тува, Убсунурская котловина, N 50.70235, E 93.24580.

магниево-натриевый тип. Во-вторых, присутствие растворенного гипса в водной вытяжке отмечается при всех четырех типах химизма по катионам и при всех сочетаниях степени засоления и содержания CSG, исключая лишь группу слабого засоления с  $CSG > 0.3\%$  при натриевом типе, что, скорее всего, является недостатком анализируемой выборки.

Продemonстрируем несколько конкретных примеров засоленных гипссодержащих почв разного гидроморфизма. На рис. 6 представлены гипссодержащие почвы с максимальным содержанием гипса в профиле до 15–60%. Показаны автоморфные (чернозем южный солончаковатый, Calcic Gypsic Chernozem (Loamic, Katosalic) разрез 40X-12, Хакасия и разрез 1Т-17, Тува), полугидроморфные (бурая лугово-пустынно-степная солончаковатая, Calcic Gypsisol (Loamic, Aphisalic, Stagnic), разрез 6Т-17, Тува) и гидроморфные (луговая солончаковая, Naplic Gypsisol (Loamic, Hypergypsic, Ochric, Epiptosalic, Stagnic), разрез 4Т-05, Тува) гипссодержащие почвы с преобладанием среди токсичных катионов магния.

О том, что представленные почвы содержат в профиле гипс, свидетельствует высокое содержание сульфатов и кальция в водных вытяжках и данные химического анализа. Также о наличии нетоксичного гипса свидетельствует большая разница между содержанием общего количества солей в профиле и токсичных солей.

По данным водных вытяжек видно, что среди катионов, помимо кальция и натрия, велика доля магния. В разрезе 40X-12 чернозема южного солончаковатого сульфатного типа засоления, сформированного на элювии плотных гипсов девонского возраста рядом с открытым месторождением гипса, доля токсичного магния доминирует над натрием и составляет от 70 до 88% от суммы токсичных катионов ( $Ca^{2+}$  связывается с сульфатами и в расчете токсичных солей не участвует). Засоление в профиле сульфатно-магниевого слабое или среднее, некоторые горизонты не засолены.

Доля магния в засоленных горизонтах южного чернозема солончаковатого разрез 1Т-17 составляет 54–71%. Максимальная доля магния от суммы токсичных катионов – 71% наблюдается при слабой степени засоления на глубине 40–60 см профиля, при средней – 54–60% на 60–150 см. Ранее считалось [12], что гипс в автоморфных почвах Тувы не встречается.

Доминирование токсичного магния (62–83% в засоленных горизонтах) среди катионов наблюдается и в бурой лугово-пустынно-степной солончаковатой почве (разрез 6Т-17, Тува, Убсунурская котловина). В разрезе 6Т-17 доминирование магния наблюдается не только при слабой степени засоления на глубине 10–40 см, но и при сильной

степени сульфатно-магниевого засоления на 40–110 см.

Максимальное содержание гипса (до 60%) наблюдалось в гидроморфной луговой почве, которая засолена лишь в верхних 7 см (разрез 4Т-05, недалеко от оз. Амдагайдын-Холь, Убсунурская котловина, Тува). Гипс содержится по всему профилю. Если в сильнозасоленном верхнем горизонте доля магния составляет 36%, то ниже при отсуствии засоления по токсичным солям и при наличии гипса, доля магния возрастает до 60–78%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В засоленных почвах среди катионов чаще, хотя не всегда, преобладает натрий. Однако, если в почве появляется гипс, то независимо от гидроморфизма в водной вытяжке среди катионов обычно возрастает доля магния. Наблюдается тенденция роста частоты встречаемости горизонтов с повышенной долей магния при появлении гипса.

Статистический анализ аналитической базы данных засоленных почв России показал следующее. Химизм засоления гипссодержащих почв преимущественно сульфатный с гипсом (56.6%), реже хлоридно-сульфатный с гипсом (23.4%), в почвах, не содержащих гипс, преобладает щелочной химизм засоления (98.4%).

Среди засоленных безгипсовых горизонтов доля токсичного магния по медиане значений не превышает 5–17% для почв разной степени засоления.

В гипссодержащих горизонтах при слабой и средней степени засоления доля токсичного магния по медиане в водной вытяжке превышает долю натрия и составляет более 50% от их суммы. Даже при сильной и очень сильной степени засоления гипссодержащих горизонтов доля магния в них составляет по медиане 43 и 31% соответственно, превышая долю магния в безгипсовых горизонтах в 6–11 раз. Частота встречаемости магниевого типа засоления среди гипссодержащих горизонтов в незасоленных, слабо- и средnezасоленных образцах 46–71%, натриево-магниевого – 11–27%, что значительно больше, чем частота встречаемости натриевого и магниево-натриевого типов засоления (0–26%). Тем не менее, необходимо отметить, что при любой степени засоления даже в гипссодержащих горизонтах встречаются образцы, в которых доля натрия выше доли магния, хотя их статистически меньше.

Вероятно, связь наличия гипса в почвах и повышенного содержания магния определяется совместным формированием гипсовых отложений в лагунно-континентальных и лагунно-морских условиях при засушливом климате с другими хемогенными осадками (каменной солью, доломитами и известняками). Так, на европейской

части России (Астраханская, Волгоградская, Воронежская, Саратовская, Самарская области, а также Республика Татарстан) формирование засоленных почв, содержащих гипс, происходит на пермских морских отложениях. Также на морских отложениях пермского периода формируются гипсодержащие почвы в Оренбургской области и Башкортостане. Формирование гипсодержащих почв Хакасии, Красноярского края и Тувы происходит на породах девона, а в Иркутской области на кембрийских засоленных морских отложениях. Нередко гипс формируется вместе с магнезитом, например, в Актальском месторождении Тувы.

Тем не менее, нельзя исключать методическую составляющую. При получении водной вытяжки из гипсодержащих почв растворенный  $\text{Ca}^{2+}$  может вступать в обменные реакции с  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  ППК, вытесняя их и увеличивая долю этих катионов в водной вытяжке.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Б.В. Теоретические основы повышения плодородия солонцов и солонцеватых почв. Автореф. дис. ... д. с.-х. н. Омск, 1956. 18 с.
2. Базилевич Н.И., Панкова Е.И. Опыт классификации почв по засолению // Почвоведение. 1968. № 11. С. 3–16.
3. Гончарова Н.А. Особенности генезиса малонатриевых солонцов и каштановых солонцеватых почв Поволжья. Автореф. дис. ... к. с.-х. н. М., 1969. 20 с.
4. Градобоев Н.Д. Природные условия и почвенный покров левобережной части Минусинской впадины // Тр. Южно-Минус. экп. Почвы Минусинской впадины. М.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 7–184.
5. Засоленные почвы России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 854 с.
6. Красная книга почв Республики Татарстан. Казань: Фолиант, 2012. 191 с.
7. Магницкий К.П. Магниевые удобрения. М.: Сельхозгиз, 1952. 110 с.
8. Мартынов В.П. Почвы горного Прибайкалья. Улан-Удэ: Бурят. книж. изд-во, 1965. 165 с.
9. Минашина Н.Г., Гаврилова Г.К. Влияние сульфатно-магниевого засоления на урожай хлопчатника на мелиорированных гипсоносных почвах Ферганской опытной станции // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2007. Вып. 60. С. 11–19.
10. Минашина Н.Г., Шишов Л.Л., Гаврилова Г.Л. Гажевые солончаки юго-западной части Голодной степи, их почвенные растворы и генезис // Почвоведение. 2004. № 5. С. 527–536.
11. Мироненко Е.В., Пачепский Я.А., Понизовский А.А. Моделирование массообмена фаз почв на основе термодинамических уравнений физико-химических равновесий. Пушино, 1981. 52 с.
12. Носин В.А. Почвы Тувы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 142 с.
13. Панкова Е.И., Голованов Д.Л., Соловьев Д.А., Ямнова И.А. История формирования и особенности почвенно-литолого-геоморфологического строения Джизакской степи как основа ее природного районирования // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 33–60. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-33-60>
14. Панкова Е.И., Ямнова И.А. Формы солевых аккумуляций в гидроморфных хлоридных и сульфатных солончаках Монголии // Почвоведение. 1980. № 2. С. 99–108.
15. Понизовский А.А., Пинский Д.Л., Воробьева Л.А. Химические процессы и равновесия в почвах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 102 с.
16. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 236 с.
17. Турдалиев Ж.М., Мансуров Ш.С., Ахмедов А.У., Абдурахмонов Н.Ю. Засоленность почвогрунтов и грунтовых вод Ферганской долины // Научное обозрение. Биол. науки. 2019. № 2. С. 10–15. <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1139> (дата обращения: 09.01.2023).
18. Убугунов В.Л. Солонцы севера Баргузинской котловины (Бурятия, Россия) // Вестник Кыргызского нац. аграрного ун-та им. К.И. Скрябина. 2017. № 2. С. 56–60.
19. Хитров Н.Б., Панкова Е.И., Новикова А.Ф., Черноусенко Г.И., Ямнова И.А. Теоретические и методические основы предотвращения вторичного засоления почв // Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2013. Т. 1. С. 383–464.
20. Черноусенко Г.И. Засоленные почвы котловин юга Восточной Сибири. М.: МАКС Пресс, 2022. 480 с.
21. Черноусенко Г.И., Курбатская С.С. Засоленность почв разных природных зон котловинных ландшафтов Тувы // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1296–1311. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17110041>
22. Черноусенко Г.И., Лопатовская О.Г., Ямнова И.А. Распространение, химизм и генезис засоленных почв Предбайкалья // География и природные ресурсы. 2005. № 2. С. 84–92.
23. Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Онищенко Л.М., Бочко Т.Ф., Лебедевский И.А., Осипов М.А., Есипенко С.В. Содержание и формы соединений магния в черноземе выщелоченном Западного Предкавказья в условиях агрогенеза // Научный журн. Куб-

- ГАУ. 2015. № 112.  
<http://ej.kubagro.ru/2015/08/pdf/124.pdf>.
24. Ямнова И.А. Микроморфологическая и минералогическая диагностика засоления почв. Автореф. дис. ... канд. биол. н. М., 1990. 24 с.
  25. Ямнова И.А., Черноусенко Г.И. Гипсоносные гажевые почвы суббореального пояса Евразии // Почвоведение. 2023. № 1. С. 3–19.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22600603>
  26. Ямнова И.А., Черноусенко Г.И., Сотнева Н.И. Засоление почв дельты р. Волги и района Западных ильменей // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2005. Вып. 57. С. 31–43.
  27. Acosta J.A., Faz A., Jansen B., Kalbitz K., Martínez-Martínez S. Assessment of salinity status in intensively cultivated soils under semiarid climate, Murcia, SE Spain // J. Arid Environ. 2011. V. 75. P. 1056–1066.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.05.006>
  28. Al-Dulaijan S.U. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to magnesium sulfate solutions // Construction and Building Materials. 2007. V. 21. P. 1792–1802.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.017>
  29. Chernousenko G.I., Yamnova I.A. Gazha Soils of Russia // 19th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM 2019: conference proceedings. Albena, Bulgaria, 30 June–6 July, 2019. Sofia, 2019. V. 19. P. 231–238.  
<https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.2/S13.031>
  30. Fu Z., Wang P., Sun J., Lu Z., Yang H., Liu J., Xia J., Li T. Composition, seasonal variation, and salinization characteristics of soil salinity in the Chenier Island of the Yellow River Delta // Global Ecology and Conservation. 2020. V. 24. P. e01318.  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01318>
  31. Gebremeskel G., Gebremicael T.G., Kifle M., Meresa E., Gebremedhin T., Girmay A. Salinization pattern and its spatial distribution in the irrigated agriculture of Northern Ethiopia: An integrated approach of quantitative and spatial analysis // Agricultural Water Management. 2018. V. 206. P. 147–157.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.007>
  32. Langmuir D. Thermodynamic properties of phases in the system CaO–MgO–CO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O // Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 1964. V. 82. P. 120.
  33. Ngabire M., Wang T., Xue X., Liao J., Sahbeni G., Huang C., Duan H., Song X. Soil salinization mapping across different sandy land-cover types in the Shiyang River Basin: A remote sensing and multiple linear regression approach // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2022. V. 28. P. 100847.  
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100847>
  34. Pessoa L.G.M., Freire M.B.G. dos S., Green C.H.M., Miranda M.F.A., Filho J.C. de A., Pessoa W.R.L.S. Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil // Ecological Indicators. 2022. V. 141. P. 109139.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109139>
  35. Pfitzner K.S., Harford A.J., Whiteside T.G., Bartolo R.E. Mapping magnesium sulfate salts from saline mine discharge with airborne hyperspectral data // Sci. Total Environ. 2018. V. 640–641. P. 1259–1271.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.396>
  36. Rusati P.K., Song K.-I. Magnesium chloride and sulfate attacks on gravel-sand-cement-inorganic binder mixture // Construction and Building Materials. 2018. V. 187. P. 565–571.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.149>
  37. Wang X., Zhang H., Zhang Z., Zhang C., Zhang K., Pang H., Bell S.M., Li Y., Chen J. Reinforced soil salinization with distance along the river: A case study of the Yellow River Basin // Agricultural Water Management. 2023. V. 279. P. 108184.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108184>
  38. Winland H.D. Stability of calcium carbonate polymorphs in warm, shallow seawater // J. Sedimentary Res. 1969. V. 39. № 4. P. 1579–1587.
  39. Yu P., Liu S., Yang H., Fan G., Zhou D. Short-term land use conversions influence the profile distribution of soil salinity and sodicity in northeastern China // Ecological Indicators. 2018. V. 88. P. 79–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.017>
  40. Zhao G., Li J., Han F., Shi M., an H. Sulfate-induced degradation of cast-in-situ concrete influenced by magnesium // Construction and Building Materials. 2019. V. 199. P. 194–206.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.022>

## Magnesium in Saline Gypsum-Containing Soils of Russia

G. I. Chernousenko<sup>1, \*</sup>, N. B. Khitrov<sup>1, \*\*</sup>, and E. I. Pankova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dokuchaev Soil Science Institute, 7, Moscow, 119017 Russia

\*e-mail: chergi@mail.ru

\*\*e-mail: khitrovn@gmail.com

Statistical analysis of 3802 samples of saline soils from different regions of Russia made possible to substantiate observations of a higher proportion of magnesium in soils containing gypsum compared to saline soils without gypsum. Gypsum is not a toxic salt and its presence does not lead to an increase in salinity. The increase of the salinity degree is mainly associated with sodium and magnesium salts, with the proportion of sodium more often than the proportion of magnesium. The article statistically substantiates that

in the studied saline soils that do not contain gypsum, among the cations in the water extract (1 : 5), sodium most often dominates at any degree of salinity. The appearance of gypsum in the soil profile is accompanied by a significant increase in the proportion of magnesium. With a low and medium degree of salinity in horizons containing more than 1% gypsum, according to the median, as well as the arithmetic mean, upper quartile and maximum, the proportion of magnesium from the sum of sodium and magnesium in the water extract (1 : 5) is often more than 50%. Even at a strong and very strong degree of salinity, the proportion of magnesium in gypsum-containing horizons is significant and amounts to 43 and 31%, respectively, on the median, which is 5.8–6.7 times higher than the proportion of magnesium in gypsum-free horizons of the same degree of salinity.

*Keywords:* gypsum, salinity chemistry, degree of salinity, cations, anions, magnesium, sodium, water extract, Calcic Gypsic Chernozem, Calcic Gypsisol, Haplic Gypsisol