

УДК 631.416.9:546.15:546.16:631.445.4(571.13)

ФТОР И ЙОД В ПОЧВАХ КУЛУНДИНСКОЙ РАВНИНЫ

© 2023 г. Г. А. Конарбаева^a, Е. Н. Смоленцева^{a, *}^aИнститут почвоведения и агрохимии СО РАН,
пр-т Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирская область, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: esmolenceva@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 06.06.2022 г.

После доработки 10.10.2022 г.

Принята к публикации 12.10.2022 г.

Содержание и распределение фтора (F) и йода (I) изучено на примере четырех почв, расположенных в котловине оз. Кучукское в Алтайском крае. Почвенные разрезы заложены на различных элементах микрорельефа в пределах древней озерной террасы. Чернозем текстурно-карбонатный стратифицированный (Calcic Chernozem (Loamic, Areninovic, Bathyraptic)) расположен на микроповышении, солончак квазиглееватый (Calcic Solonchak (Loamic, Sulfatic, Humic)) – в микропонижении. К микросклону между этими почвами приурочены солонец темный квазиглееватый засоленный (Protosalic Solonetz (Loamic, Humic)) и чернозем текстурно-карбонатный квазиглееватый засоленный (Calcic Gleyic Chernozem (Loamic, Endosalic)). Абсолютное превышение по высоте между черноземом и солончаком составляет 2 м. Определяли общее содержание галогенов и их подвижные формы: водорастворимую для F и солерастворимую для I. Содержание общего F в почвах в среднем составило 277.40 мг/кг (пределы варьирования 59.83–541.10 мг/кг), водорастворимого – соответственно 3.47 мг/кг (0.04–16.45 мг/кг). Установлено, что содержание общего F в сильной степени коррелирует с содержанием ила, карбонатов и водорастворимого натрия, а величина коэффициента корреляции зависит от типа почвы и ее положения в рельефе. Для водорастворимого F высокая положительная корреляция с аналогичными параметрами обнаружена для чернозема на микроповышении и солонца. Выявлено, что содержание общего I в почвах озерной террасы больше, чем в зональных, составляет в среднем 13.61 мг/кг почвы (5.27–15.21 мг/кг) и зависит от содержания ила и карбонатов. Влияния типа почвы и ее положения в микрорельефе на содержание общего I не выявлено. Среднее содержание солерастворимого I составляет 0.71 мг/кг (0.01–1.86 мг/кг). Для всех почв, кроме солончака, установлена взаимосвязь содержания $I_{\text{сол}}$ с содержанием ила, карбонатов и водорастворимого натрия. Для солончака значимой корреляции между вышеуказанными параметрами не установлено. Выявленную гетерогенность пространственного распределения F и I в почвах озерных котловин необходимо учитывать региональные особенности этих галогенов.

Ключевые слова: галогены, засоленные почвы, чернозем (Chernozem), солонец (Solonetz), солончак (Solonchak), озеро Кучукское, Западная Сибирь

DOI: 10.31857/S0032180X22600792, **EDN:** BKDQQU

ВВЕДЕНИЕ

Фтор и йод, как и другие макро- и микроэлементы, участвуют в процессе формирования пищевой цепочки: почва–растения–животные–человек [1, 3, 14, 18, 47, 50, 57, 58]. Фтор (F) входит в число биологически активных элементов и влияет на физиологические процессы в живых организмах всех трофических уровней [1, 21, 40, 58]. С одной стороны, он необходим в определенных количествах для физиологических процессов, поэтому его относят к эссенциальным элементам [58]. С другой стороны, избыток F оказывает токсическое воздействие на организм человека [11], поэтому он принадлежит к элементам первого класса опасности и стоит на втором месте после ртути по деструктивному действию на живое вещество [58].

Почва способна аккумулировать значительное количество F, особенно в горизонте В, если он обогащен глинистыми минералами относительно ее верхних горизонтов, обладающими высокой сорбционной способностью и склонностью к взаимодействию с F [20, 21, 40, 58, 63]. В природных условиях фтор малоподвижен, однако в кислых почвах его растворимость повышается из-за образования NaF, KF, NH_4F [37, 40, 58, 62]. Важную роль в миграции F в почвах играет и низкая растворимость его наиболее распространенной соли CaF_2 , что вызывает осаждение этого галогена на карбонатно-кальциевом щелочном геохимическом барьере [20, 30, 40]. Известно влияние реакции почвенной среды на аккумуляцию F: щелочные почвы обладают меньшей способностью к

его фиксации, чем кислые [40, 52]. Показана возможность эмиссии значительных количеств газообразного HF из кислых почв в атмосферу [37]. Особое внимание при исследовании F уделяется его геохимически более активной водорастворимой форме [4, 24, 25, 38, 39]. Изучение геохимии F, источников его поступления в пищевые цепи, в том числе из почв, является важной задачей, позволяющей наметить пути профилактики и коррекции негативного воздействия этого галогена на человека и животных.

Йод (I) является эссенциальным микроэлементом, его дефицит вызывает ряд заболеваний человека и животных, называемых йододефицитными расстройствами [14, 18, 47, 50]. Они возникают в областях, где есть недостаток I в геохимической среде. Поскольку основным источником I в глобальном цикле является океан и океанические отложения [3, 10, 30, 47, 50, 61], то йододефицитными оказываются внутриконтинентальные области, в которых основными природными источниками этого галогена для растений и животных являются почвы [14, 20, 50, 54, 57]. Поэтому изучение и оценка йодного статуса почв в таких областях имеет важное значение для здоровья человека. К настоящему времени установлено, что мобильность соединений I в почвах зависит от его ионного состояния [48, 49, 54, 66, 67], типа почвы и реакции среды [46, 53, 56, 57, 64], содержания органического вещества и физической глины [14, 15, 20, 31, 56–58, 60, 65, 68, 69].

К сожалению, в настоящее время изученность содержания I и его различных форм в почвах России отстает от мирового уровня, что обусловлено различными причинами. Учитывая огромные площади внутриконтинентальных областей сибирского региона, вероятно, испытывающих дефицит I, исследования йодного статуса его почв весьма актуальны.

Цель работы — оценка содержания и профильного распределения различных форм F и I в почвах Кулундинской равнины.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования. Особенности содержания и распределения галогенов изучали на примере почв, расположенных на древней террасе оз. Кучукское, которое находится в Алтайском крае. Эта территория входит в состав Кулундинской равнины, являющейся одной из озерно-аллювиальных равнин степного биота Западной Сибири. По почвенно-экологическому районированию [43] территория относится к Предалтайской сухостепной провинции темно-каштановых и каштановых почв. На равнине широко распространены озера, к котловинам которых приурочены полугидромофные, гидроморфные и засоленные поч-

вы. Такие местообитания интенсивно используются как пастбища, поэтому от свойств почв этих угодий зависит вещественный состав кормовых растений, в том числе содержание в них F и I, и в конечном счете здоровье животных и человека.

Рельеф равнины слабоволнистый с абсолютными высотами от 95 до 150–60 м, осложненный котловинами многочисленных озер. Крупнейшие из них — Кулундинское и Кучукское, приуроченные к центральной пониженной части равнины. В результате деградации озер в течение неоплейстоцена вокруг них на разных гипсометрических уровнях сформировались системы террасовых поверхностей [8]. Почвообразующие породы — субэральные неоплейстоценовые макропористые лёссовидные карбонатные суглинки, которые подстилаются более древними озерными отложениями [8].

Климат Кулундинской равнины континентальный, отличается жарким засушливым летом и холодной малоснежной зимой, среднегодовая температура воздуха составляет 2.0°C [44]. Средняя температура воздуха в январе составляет –17.5°C, июля — +19.4°C [44]. Годовое количество осадков варьирует от 250 до 350 мм, коэффициент увлажнения равен 0.38 [13]. Зональным типом растительности Кулундинской равнины являются настоящие степи [2], которые сейчас повсеместно распаханы. К озерным котловинам приурочены засоленные местообитания, растительность которых представлена солонцово-солончаковыми лугами и галофитными сообществами [2].

Геохимической особенностью равнины является ее бессточность и процессы континентального соленакопления в почвах, грунтовых и поверхностных водах [6, 27]. По степени минерализации и химическому составу солей воды озер отличаются большой пестротой [27]. Вода оз. Кучукское относится к рассолам: содержание солей в ней составляет 178 г/л, состав сульфатно-хлоридно-натриевый [27].

Почвенные разрезы расположены на различных элементах микрорельефа и характеризуют основные компоненты почвенного покрова (табл. 1). Три разреза заложены на поверхности террасы (КЧ-4, КЧ-5, КЧ-6) и один (КЧ-3) — на береговом озерном валу. Разрез КЧ-3 характеризует полнопрофильную голоценовую почву, погребенную (стратифицированную) под песчаными озерными отложениями, в результате трансгрессии озера в позднем голоцене [51]. Почва разреза КЧ-3 — это чернозем текстурно-карбонатный стратифицированный (Calcic Chernozem (Loamic, Areninovic, Bathyraptic)), который перекрыт слоем песка мощностью 30 см. Погребение слабо повлияло на свойства и признаки почвы [51], что позволяет использовать ее как аналог незасоленных почв для изучения галогенов. Разрез КЧ-3

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Разрез	Название почвы (тип и подтип) по [17, 32]	Формула профиля по [32]	Координаты, град		Название почвы по WRB [55]
			широта	долгота	
КЧ-3	Чернозем текстурно-карбонатный стратифицированный	AU—C—[AUca]—CAT— BCca—Cca—D	52.627	79.733	Calcic Chernozem (Loamic, Areninovic, Bathyraptic)
КЧ-4	Солонец темный квазиглееватый засоленный	SEL—ASN—ASNca,s— BCAs—Cca,q,s	52.627	79.732	Protosalic Solonetz (Loamic, Humic)
КЧ-5	Чернозем текстурно-карбонатный квазиглееватый засоленный	AU—AUca—AUca,s—CATs— Cca,q,s—D1—D2	52.626	79.732	Calcic Gleyic Chernozem (Loamic, Endosalic)
КЧ-6	Солончак квазиглееватый	S—Bq,s,cs—Cq,s	52.625	79.733	Calcic Solonchak (Loamic, Sulfatic, Humic)

расположен выше остальных по микрорельефу [5]. По положению в микрорельефе остальные разрезы образуют последовательность (от более высокой позиции к более низкой): КЧ-4 (солонец темный квазиглееватый засоленный (Protosalic Solonetz (Loamic, Humic)), КЧ-5 (чернозем квазиглееватый засоленный (Calcic Gleyic Chernozem (Loamic, Endosalic)) и КЧ-6 (солончак квазиглееватый (Calcic Solonchak (Loamic, Sulfatic, Humic)). Солончак расположен в микропонижении. Абсолютное превышение между КЧ-3 и КЧ-6 составляет около 1 м. Разрезами вскрыты подстилающие породы (D), представленные древними озерно-аллювиальными песками и супесями.

Названия почв определены по классификации почв России [17, 32] и международной классификации World Reference Base for Soil Resources (WRB) [55]. Классификацию почвы, перекрытой слоем голоценовых озерных отложений, по WRB проводили по правилам для погребенных почв ([55], с. 21). Формулы почвенных профилей (табл. 1) составлены с использованием обозначений типодиагностических горизонтов по [32].

Методы исследования. Почвенные образцы отобрали по генетическим горизонтам с последующей стандартной пробоподготовкой с учетом требований для каждого вида анализов [42]. Определяли следующие показатели: содержание органического углерода ($C_{орг}$) по методу Тюрина [42], карбонатов — газовольметрическим методом на кальциметре [29]. Величину pH — потенциометрически в водной суспензии (почва : раствор 1 : 2,5), обменные основания — методом Пфедффера в модификации Молодцова и Игнатовой [36] с последующим определением катионов Ca, Mg, Na и K атомно-абсорбционным методом. Гранулометрический состав исследовали методом пипетки с диспергацией образца пирофосфатом натрия [41]. Содержание легкорастворимых солей и значение удельной электропроводности (УЭП) определяли в водной вытяжке (почва : вода = 1 : 5), катионы — атомно-абсорбционным методом, анионы — по общепринятым методикам [42].

В рамках данного исследования уделили внимание не только общему (валовому) содержанию F и I, но и подвижным формам этих элементов. Для F таковой является водорастворимая форма, для I — водо- и солерастворимая [48, 49, 53]. Так как концентрация водорастворимой формы йода в почвах континентальных областей низкая [19, 21, 23, 25, 26, 45], исследовали солерастворимую форму [22]. Содержание F в почве определили потенциометрически: общее — ионселективным электродом по методу Головковой [7], водорастворимую форму — с использованием фторидселективного электрода. Валовой I анализировали кинетическим роданидно-нитритным методом [33], солерастворимую форму — в экстракте 0.1 М KCl по [22]. Статистическую обработку данных проводили по [12], расчеты и визуализация результатов — с использованием программы Microsoft Excel 2016.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общая характеристика почв. Изученные почвы имеют нейтральную и слабо- и щелочную реакцию среды по всему профилю (табл. 2). Во всех почвах, в том числе солончаке, выражена аккумуляция органического углерода ($C_{орг}$), максимум которого приурочен к поверхностным горизонтам. Профильное распределение его резко убывающее. Чернозем стратифицированный имеет два максимума содержания $C_{орг}$: один приурочен к поверхностному гумусовому горизонту, другой — к погребенному. Солонец темный (КЧ-4) и чернозем квазиглееватый (КЧ-5) имеют высокое содержание $C_{орг}$, солончак — среднее. Содержание карбонатов в почвах варьирует от 2.1 до 40.7%. Все горизонты солончака, а также текстурно-карбонатный горизонт САТ в разрезах КЧ-3 и КЧ5 содержат большое количество карбонатов, поверхностные горизонты слабокарбонатны.

Для изученных почв характерно литогенно обусловленное варьирование гранулометрического состава по профилю. Верхние горизонты

Таблица 2. Свойства почв Кулундинской равнины

Горизонт	Глубина образца, см	pH H ₂ O	C _{орг}	CaCO ₃	Ил, <0.001 мм	ФГ*, <0.01 мм	Обменные основания				
							сумма, смоль (+)/кг	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Разрез КЧ-3. Чернозем текстурно-карбонатный стратифицированный											
AU	0—10	7.16	2.43	2.1	6.5	14.4	16.87	83	10	2	5
C	20—30	7.73	0.38	3.7	11.6	17.2	9.82	75	12	4	9
[AUca]	35—45	7.96	1.76	4.7	19.4	35.9	19.14	70	15	4	11
[AUca]	50—60	8.15	1.40	7.6	24.2	38.2	16.10	70	14	5	11
[AUca]	60—70	8.26	0.99	8.4	25.3	40.2	13.74	66	17	6	12
CAT	80—90	8.50	0.39	23.2	36.5	54.2	12.40	60	19	8	13
CAT	90—100	8.52	0.40	19.8	30.0	43.7	8.30	53	20	10	17
BCca	105—115	8.67	0.30	16.8	26.0	37.0	7.51	48	22	14	17
Cca	130—140	8.60	0.18	17.2	25.9	38.2	6.52	61	4	13	21
D	150—160	8.64	0.09	9.2	14.6	18.0	13.79	73	17	5	5
Разрез КЧ-4. Солонец темный квазиглееватый засоленный											
SEL	0—5	6.41	1.99	2.1	5.9	16.6	32.47	76	20	1	3
ASN	5—14	6.88	2.81	2.1	9.8	24.8	29.34	65	12	20	3
ASNca,s	16—26	7.08	2.22	5.8	18.6	35.6	19.70	62	18	15	5
BCAs	30—40	7.17	1.08	6.3	21.4	36.8	15.64	56	26	12	6
BCAs	48—58	7.94	0.30	11.3	27.6	39.8	12.08	45	30	17	8
BCca,q,s	65—75	8.71	0.17	14.2	30.4	50.3	11.70	33	41	19	7
Cca,q	110—120	8.80	0.15	12.9	29.1	47.4	12.12	27	49	18	6
Разрез КЧ-5. Чернозем текстурно-карбонатный квазиглееватый засоленный											
AU	0—6	7.20	4.91	6.3	9.8	21.1	36.01	76	19	2	3
AUca	6—16	7.17	3.70	13.8	12.6	25.2	37.50	66	27	5	2
AUca,s	20—30	7.16	2.84	15.1	16.2	29.3	23.69	46	41	10	3
CATs	30—40	7.73	0.68	16.8	23.8	38.1	19.27	41	40	13	6
CATs	45—55	7.97	0.33	19.7	33.0	49.9	15.90	48	27	19	6
Cca,q,s	60—70	8.51	0.21	26.0	33.2	48.6	14.42	45	25	24	6
D1	80—90	8.51	0.04	6.3	16.6	20.0	12.15	23	48	25	5
D2	120—130	8.58	0.08	3.8	10.8	13.1	8.30	24	47	24	5
Разрез КЧ-6. Солончак квазиглееватый											
S	0—10	7.00	2.40	29.4	13.0	23.2	21.12	54	16	25	5
S	10—20	7.34	0.96	40.7	25.4	42.3	15.76	38	21	35	6
S	20—30	7.64	0.63	38.8	34.1	48.5	16.19	32	29	34	5
Bq,s,cs	40—50	7.63	0.22	33.2	15.8	40.6	14.62	31	46	19	4
Cq,s	70—80	7.62	0.05	28.4	25.9	37.4	13.73	34	47	17	2

* ФГ – физическая глина.

имеют супесчано-легкосуглинистый состав, средние – преимущественно среднесуглинистый. Подстилающие породы, вскрытые разрезами КЧ3, КЧ4 и КЧ-5, представлены супесями. Содержание ила в почвах варьирует от 5.9 до 36.5%: минимальное количество приурочено к поверх-

ностному горизонту SEL, максимальное – к текстурно-карбонатному CAT.

Сумма обменных оснований в гумусовых горизонтах высокая, вниз по профилю она уменьшается до средней. В черноземе текстурно-карбонатном стратифицированном во всех горизонтах

Таблица 3. Результаты анализа водной вытяжки образцов почв Кулундинской равнины

Горизонт	Глубина, см	УЭП, дСм/м	Сумма солей	Сумма токсичных солей	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
			%		смоль(экв)/кг							
Разрез КЧ3. Чернозем текстурно-карбонатный стратифицированный												
AU	0—10	0.09	0.045	0.047	0.06	0.50	0.13	0.11	0.44	0.08	0.05	0.09
C	20—30	0.25	0.114	0.037	0.06	1.04	0.13	0.21	0.70	0.18	0.16	0.37
[AUca]	35—45	0.32	0.137	0.088	0.10	1.03	0.36	0.22	0.60	0.17	0.70	0.46
[AUca]	50—60	0.41	0.167	0.110	0.11	1.24	0.40	0.43	0.70	0.18	0.93	0.40
[AUca]	60—70	0.36	0.141	0.101	0.13	1.13	0.33	0.27	0.50	0.16	0.81	0.33
CAT	80—90	0.39	0.166	0.126	0.11	1.32	0.26	0.52	0.50	0.15	1.09	0.28
CAT	90—100	0.38	0.150	0.110	0.08	1.22	0.18	0.55	0.50	0.15	0.89	0.24
Bcca	105—115	0.30	0.129	0.093	0.09	1.18	0.18	0.19	0.45	0.12	0.93	0.23
Cca	130—140	0.26	0.121	0.093	0.10	1.12	0.18	0.21	0.35	0.16	0.73	0.21
D	150—160	0.21	0.099	0.071	0.06	0.94	0.20	0.12	0.35	0.18	0.52	0.12
Разрез КЧ4. Солонец темный квазиглееватый засоленный												
SEL	0—5	0.20	0.085	0.060	0.00	0.57	0.31	0.29	0.35	0.25	0.30	0.20
ASN	5—14	0.27	0.100	0.080	0.00	0.54	0.51	0.50	0.30	0.16	0.52	0.13
ASNca,s	16—26	0.88	0.266	0.185	0.07	0.49	1.75	1.96	1.10	0.41	1.91	0.18
BCAs	30—40	1.50	0.498	0.419	0.07	0.61	1.10	5.62	1.05	0.49	4.92	0.26
BCAs	48—58	1.31	0.440	0.400	0.17	0.62	0.87	4.71	0.50	0.25	5.13	0.23
Cca,q,s	65—75	0.92	0.327	0.307	0.33	1.37	0.87	2.37	0.25	0.25	3.31	0.10
D	80—90	0.60	0.204	0.184	0.20	0.90	0.56	1.37	0.25	0.16	2.04	0.08
Cca,q	110—120	1.05	0.338	0.326	0.37	1.01	0.79	2.94	0.15	0.25	3.74	0.10
Разрез КЧ5. Чернозем текстурно-карбонатный квазиглееватый засоленный												
AU	0—6	0.29	0.156	0.040	0.07	1.00	0.08	0.82	0.70	0.33	0.57	0.23
AUca	6—16	1.00	0.332	0.257	0.10	0.83	0.31	2.93	0.95	0.66	2.31	0.20
AUca,s	20—30	2.44	0.846	0.663	0.13	0.51	1.78	8.46	2.59	2.72	5.92	0.26
CAT	30—40	1.82	0.513	0.497	0.10	0.57	1.86	5.22	1.20	1.15	4.92	0.31
CAT	45—55	1.61	0.586	0.250	0.17	0.61	2.54	3.71	0.35	0.58	5.74	0.10
Cca	60—70	1.51	0.509	0.248	0.23	0.64	2.28	3.40	0.25	0.33	5.74	0.08
D1	80—90	0.98	0.479	0.189	0.17	0.67	1.78	2.09	0.20	0.16	3.91	0.03
D2	120—130	0.73	0.334	0.138	0.17	0.67	0.76	1.47	0.15	0.16	3.13	0.03
Разрез КЧ6. Солончак квазиглееватый												
S	0—10	3.77	1.489	1.066	0.07	0.70	0.79	20.92	9.03	0.99	8.40	0.64
S	10—20	5.24	1.899	1.372	0.07	0.62	4.20	24.86	7.64	0.99	14.31	0.56
S	20—30	4.84	1.672	1.401	0.13	0.52	5.75	20.45	3.89	1.48	14.79	0.36
Bq,s,cs	40—50	4.77	1.774	1.202	0.07	0.39	6.35	21.49	8.33	4.20	11.53	0.20
Cq,s	70—80	4.01	1.390	0.991	0.07	0.38	6.04	16.47	5.79	3.04	8.70	0.18

преобладает обменный кальций. В солонце его количество уменьшается, но увеличивается доля натрия, особенно в солонцовом горизонте. В черноземе квазиглееватом значительно больше доля магния, по сравнению с черноземом стратифицированным. В солончаке доля обменного кальция меньше в 2 раза, чем в черноземе, значительно увеличивается доля натрия по сравнению с остальными почвами, однако признаки солонцеватости морфологически не выражены.

Особенностью изученных почв является аккумуляция в них разного количества водорастворимых солей. Чернозем текстурно-карбонатный (КЧ-3) незасолен, о чем свидетельствуют значения УЭП и суммы солей в водной вытяжке (табл. 3). В солонце (КЧ-4) соленакопление начинается в нижней части солонцового горизонта ASN, тип засоления хлоридно-сульфатный кальциево-натриевый, степень засоления слабая. Максимум аккумуляции солей приурочен к средней части

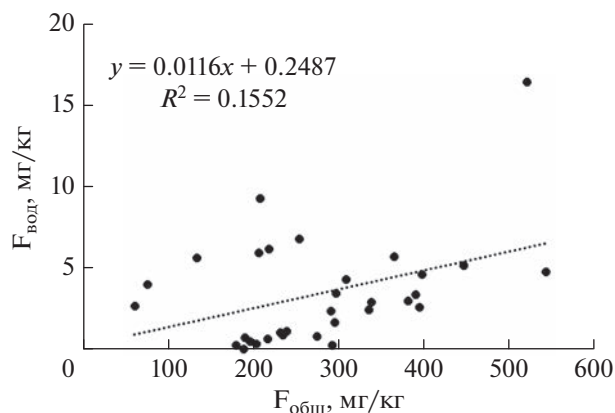


Рис. 1. Зависимость содержания общего и водорастворимого фтора в почвах Кулундинской равнины.

профиля, тип засоления сульфатный натриевый, средняя степень засоления. Почвообразующая и подстилающая породы засолены слабо. В разрезе КЧ-5 сильное засоление приурочено к нижней части гумусового горизонта, тип засоления — сульфатный кальциево-натриевый. Нижние горизонты почвы и почвообразующая порода имеют хлоридно-сульфатно-натриевый тип засоления средней степени. Максимальное соленакопление характерно для солончака (КЧ-6). Тип засоления сульфатный натриево-кальциевый в верхних 20 см, в нижней части — хлоридно-сульфатный кальциево-натриевый, степень засоления очень сильная. Сильная степень засоления поверхностного гумусового горизонта характерна только для солончака, в остальных почвах он не засолен или засолен слабо. В составе анионов водной вытяжки, особенно в срединных горизонтах, значительно преобладает сульфат-анион, в составе катионов — натрий, что соответствует хлоридно-сульфатно-натриевому типу засоления. Максимум аккумуляции солей в изученных почвах расположен на разной глубине: в солонце 30–60 см (сумма токсичных солей 0.400–0.419%), в черноземе квазиг-

лееватом — 20–40 см (0.663–0.497%), в солончаке сильное засоление (1.066%) начинается с поверхности.

Содержание и профильное распределение фтора. Общее содержание фтора (F) в изученных почвах в среднем составляет 277.40 мг/кг и варьирует в интервале 59.83–541.10 мг/кг, водорастворимого фтора ($F_{\text{вод}}$) — соответственно 3.47 и 0.04–16.45 мг/кг (табл. 4). Доля $F_{\text{вод}}$ от общего содержания мала и изменяется в интервале от 0.02–5.33%, составляя в среднем 1.44%. Величина коэффициента вариации высокая, особенно для $F_{\text{вод}}$. Выявлена слабая зависимость (положительный линейный тренд) между содержанием общего F и $F_{\text{вод}}$ (рис. 1).

Максимальные количества F обнаружены в солончаке и черноземе тектурно-карбонатном стратифицированном (рис. 2а). Общее содержание F достигает максимума в верхней части тектурно-карбонатного горизонта, минимум отмечен в подстилающей породе супесчаного гранулометрического состава. Корреляция общего содержания F с содержанием ила средняя (табл. 5).

Максимумы валового содержания F в разрезах КЧ-3, КЧ-4 и КЧ-5 составляют 337–445 мг/кг почвы, а в солончаке (КЧ-6) оно достигает 540 мг/кг. Аккумуляция галогена во всех разрезах происходит в верхних 100 см. Ближе всего к поверхности зона аккумуляции F расположена в солончаке, глубже всего — в черноземе стратифицированном. Расчеты показали, что значения коэффициента корреляции (r) для параметров ил/валовой F возрастают в изученных почвах в такой последовательности: чернозем стратифицированный < солонец < чернозем квазиглееватый < солончак. Для солончака, приуроченного к микропонижению, получена высокая положительная корреляция $F_{\text{общ}}$ с содержанием ила ($r = 0.70$).

Карбонатный горизонт в изученных почвах является геохимическим барьером, но по-разному влияет на накопление валового F в почвах. Так, для чернозема стратифицированного корреляция между содержанием $F_{\text{общ}}$ и карбонатов сла-

Таблица 4. Статистические показатели содержания фтора и йода и их подвижных форм в почвах Кулундинской равнины

Показатель ($n = 32$)	Фтор			Йод		
	общий	водорастворимый	водораст. от $F_{\text{общ}}$, %	общий	солерастворимый	солераст. от $I_{\text{общ}}$, %
$X_{\text{ср}}$, мг/кг	277.40	3.47	1.44	13.61	0.71	5.02
X_{min} , мг/кг	59.83	0.04	0.02	5.27	0.01	0.11
X_{max} , мг/кг	541.10	16.45	5.33	15.21	1.86	12.40
σ , мг/кг	110.90	3.27	1.47	2.10	0.50	3.20
V , %	40.0	94.3	103.9	15.4	69.3	63.4

Примечание: n — количество значений, σ — стандартное отклонение, V — коэффициент вариации.

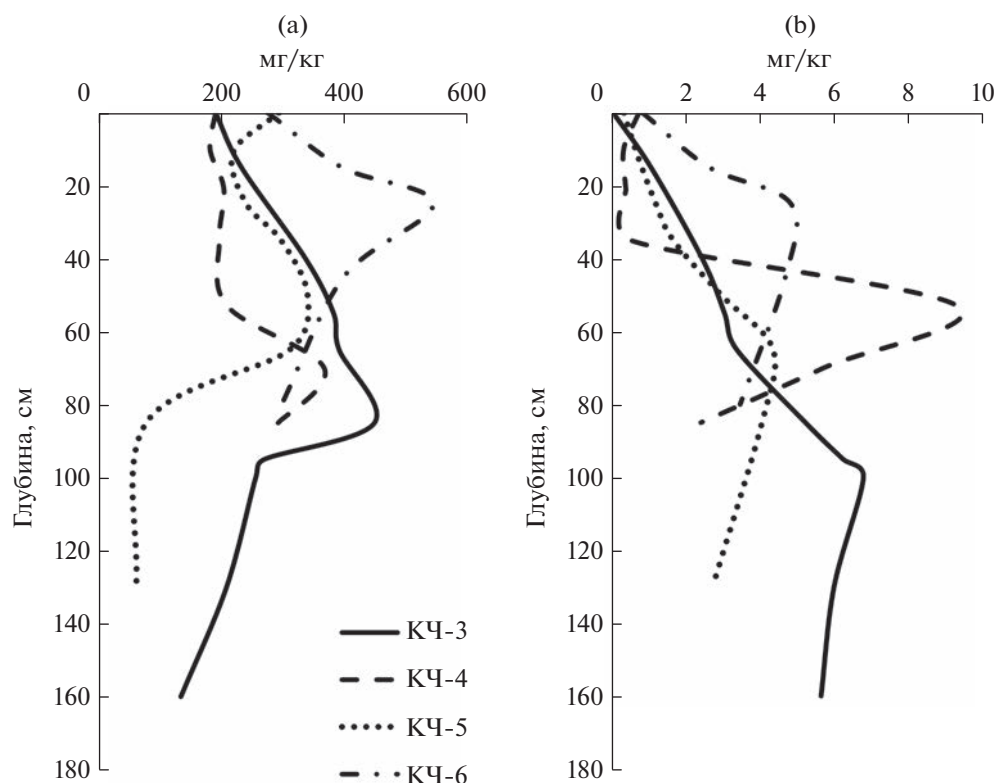


Рис. 2. Содержание и профильное распределение общего (а) и водорастворимого (б) фтора в почвах Кулундинской равнины: КЧ-3 – чернозем текстурно-карбонатный стратифицированный, КЧ-4 – солонец темный квазиглееватый засоленный, КЧ-5 – чернозем текстурно-карбонатный квазиглееватый засоленный, КЧ-6 – солончак квазиглееватый.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между почвенными свойствами и содержанием фтора и йода

Показатель	Разрез	Коэффициент корреляции			
		фтор		йод	
		валовой	водорастворимый	валовой	солерастворимый
Ил (<0.001 мм)	КЧ-3 (чернозем)	0.51	0.79	0.51	0.84
	КЧ-4 (солонец)	0.55	0.70	0.67	0.90
	КЧ-5 (ч/з* квазигл.)	0.60	0.59	0.40	0.91
	КЧ-6 (солончак)	0.70	0.55	–0.16	–0.61
	По всем почвам	0.52	0.59	0.43	0.70
Карбонаты	КЧ-3 (чернозем)	0.15	0.75	0.48	0.97
	КЧ-4 (солонец)	0.62	0.76	0.47	0.89
	КЧ-5 (ч/з квазигл.)	0.74	0.27	0.66	0.73
	КЧ-6 (солончак)	0.78	0.34	0.55	–0.07
	По всем почвам	0.43	0.20	0.54	0.58
Na ⁺	КЧ-3 (чернозем)	0.62	0.72	0.59	0.72
	КЧ-4 (солонец)	0.26	0.52	0.42	0.53
	КЧ-5 (ч/з квазигл.)	0.26	0.50	0.21	0.76
	КЧ-6 (солончак)	0.89	0.53	0.37	0.11
	По всем почвам	0.34	0.07	0.41	0.62

* ч/з квазигл. — чернозем квазиглееватый.

бая ($r = 0.15$), а для солончака — сильная ($r = 0.78$). В среднем по почвам влияние этого барьера среднее ($r = 0.43$). Корреляция содержания $F_{\text{общ}}$ и водорастворимого Na^+ для всех почв средняя ($r = 0.34$), но для солончака ($r = 0.89$) и чернозема ($r = 0.62$) она сильная.

В среднем по почвам установлена положительная умеренная связь содержания $F_{\text{вод}}$ с содержанием ила и слабая корреляция с содержанием карбонатов и водорастворимого Na^+ в водной вытяжке. Для параметров ил/ $F_{\text{вод}}$, по сравнению с $F_{\text{общ}}$, величины r расположены в обратном порядке: солончак < чернозем квазиглееватый < солонец < чернозем стратифицированный.

Профильное распределение $F_{\text{вод}}$ в черноземе текстурно-карбонатном стратифицированном (КЧ-3) аналогично распределению общего его содержания: максимум приурочен к текстурно-карбонатному горизонту (рис. 2b), минимум — к верхнему гумусовому горизонту. Для этой почвы получена высокая корреляция содержания $F_{\text{вод}}$ от содержания ила ($r = 0.79$), карбонатов ($r = 0.75$) и катиона натрия водорастворимых солей ($r = 0.72$).

Максимальное количество $F_{\text{вод}}$ обнаружено в солонце темном (КЧ-4) в аккумулятивно-карбонатном горизонте (9.3 мг/кг почвы). В поверхностном гумусовом горизонте всех почв оно низкое (0.04–0.83 мг/кг). Профильное распределение этой формы имеет сходство с распределением содержания $F_{\text{общ}}$ и в других изученных почвах. Максимум содержания $F_{\text{вод}}$, как и общего, приурочен к горизонту с максимальным содержанием ила и физической глины, а также с высоким содержанием карбонатов. Зависимость содержания $F_{\text{вод}}$ от содержания ила и карбонатов высокая ($r = 0.70$ и 0.76 соответственно). Зависимость содержания $F_{\text{вод}}$ от содержания ила и Na^+ в черноземе квазиглееватом засоленном (КЧ-5) и солончаке средняя и от содержания карбонатов — слабая.

Есть сведения [38], что концентрация $F_{\text{вод}}$ растет с увеличением степени засоления почв. Мы согласны с мнением авторов, однако считаем, что установленная ими в верхних горизонтах почв высокая степень корреляция между содержанием $F_{\text{вод}}$ и концентрациями сульфатов, бикарбонатов, а также суммой солей, не всегда имеет место во всем почвенном профиле, по крайней мере, в наших объектах. Корреляционный анализ между содержанием F и $F_{\text{вод}}$ и количеством бикарбонатов, сульфатов и суммой солей для почв Кулундинской равнины не выявил существенной взаимосвязи. Так, коэффициенты корреляции (r) и детерминации (r^2) между содержанием сульфат-аниона и $F_{\text{вод}}$ низкие: в солончаке их величина оставляет -0.17 и 0.03 соответственно, в черноземе стратифицированном 0.21 и 0.04 , в солонце 0.24 и 0.06 и 0.44 и 0.19 — в черноземе квазиглеева-

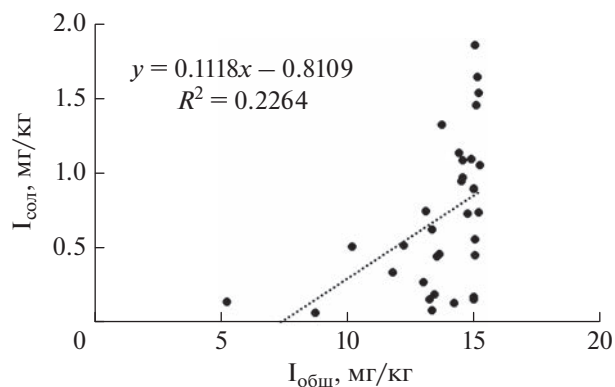


Рис. 3. Зависимость содержания общего и солерастворимого йода в почвах Кулундинской равнины.

том. Это доказывает, что связь между признаками слабая и средняя, а доли изменений, зависящие от этих факторов, незначительны. Корреляция между $F_{\text{вод}}$ и водорастворимым Na^+ средняя: для этих параметров значения r и r^2 равны соответственно 0.52 и 0.18 в солонце, 0.53 и 0.28 в солончаке, 0.62 и 0.38 в черноземе квазиглееватом, 0.72 и 0.52 в черноземе стратифицированном. Это свидетельствует, что только для почвы микроповышения содержание $F_{\text{вод}}$ зависит от содержания катиона Na .

Содержание и профильное распределение йода.

Общее содержание I в изученных почвах значительно меньше, чем F , и составляет в среднем 13.61 мг/кг почвы, пределы варьирования — от 5.27 до 15.21 мг/кг. Среднее для всех почв катены содержание солерастворимого I составило 0.71 мг/кг (или 5.02% от общего), оно варьирует в пределах 0.01 – 1.86 мг/кг. Выявлен слабый линейный тренд зависимости количества солерастворимого йода от общего его содержания (рис. 3). Коэффициент вариации общего содержания йода низкий, солерастворимой формы — высокий. Больше всего содержится валового I в солончаке (15.00 – 15.21 мг/кг почвы), близкие значения обнаружены в черноземе квазиглееватом засоленном (14.88 – 14.16 мг/кг почвы) (рис. 4a). Минимум содержания приурочен к верхним супесчаным горизонтам в профиле чернозема текстурно-карбонатного стратифицированного. В остальных почвах содержание $I_{\text{общ}}$ варьирует незначительно, максимум аккумуляции в профиле не выражен (КЧ-5 и КЧ-6) или выражен слабо (КЧ-4). Корреляционный анализ показал умеренную связь общего содержания I с содержанием ила ($r = 0.43$) в изученных почвах. Для трех почв катены корреляция параметров $I_{\text{общ}}$ /ил средняя, максимальное значение $r = 0.67$ для них имеет солонец, для солончака она слабая.

Содержание солерастворимого йода ($I_{\text{сол}}$) в изученных почвах значительно варьирует, а профильное распределение имеет сложный характер

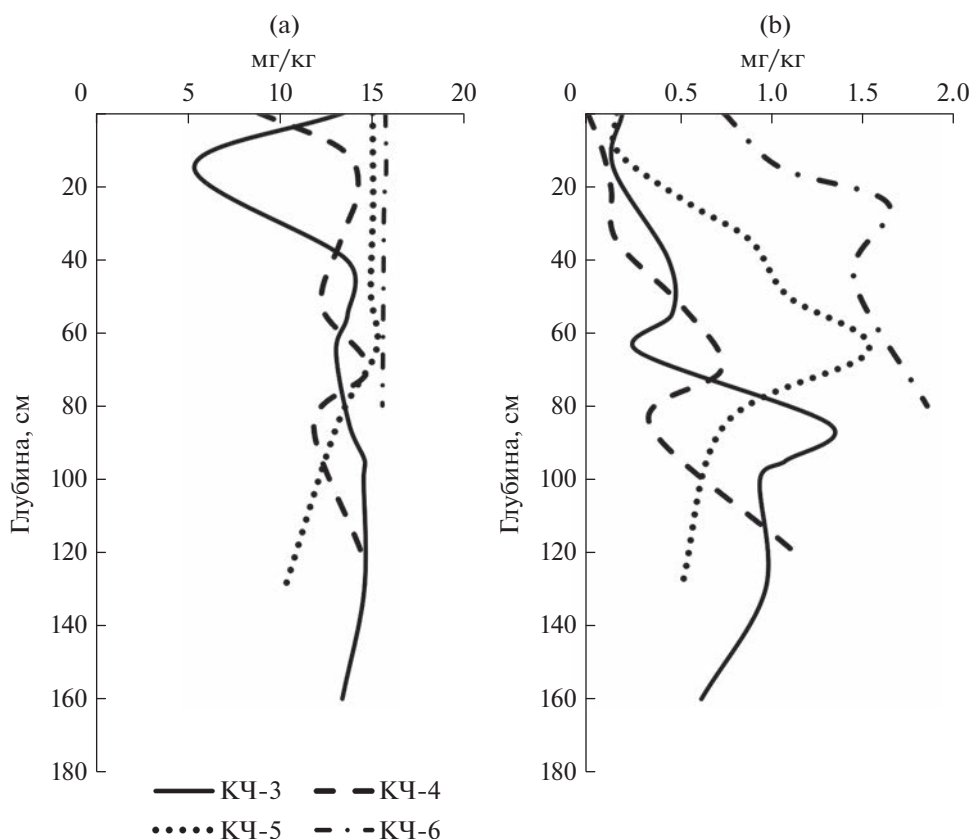


Рис. 4. Профильное распределение содержания общего йода (а) и растворимой формы (б) в почвах Кулундинской равнины.

(рис. 4б). Максимум содержания этой формы обнаружен в солончаке, минимум — в черноземе текстурно-карбонатном квазиглееватом. По содержанию $I_{\text{сол}}$ в верхних 50 см почвы образуют ряд: солончак > солонец > чернозем текстурно-карбонатный стратифицированный > чернозем квазиглееватый. Доля $I_{\text{сол}}$ от общего содержания I наибольшая в солончаке, где она составляет 5.0–12.4%, наименьшая в солонце — 0.7–5.0%.

Распределение $I_{\text{сол}}$ по профилю чернозема текстурно-карбонатного стратифицированного имеет сложный характер. Выделяются две зоны аккумуляции: погребенный гумусовый и текстурно-карбонатный горизонты, к последнему приурочен максимум содержания $I_{\text{сол}}$. Корреляционный анализ показал высокую степень связи содержания $I_{\text{сол}}$ в этой почве с содержанием ила и катиона натрия, особенно с содержанием карбонатов ($r = 0.97$). В солонце темном (КЧ-4) и в черноземе квазиглееватом засоленном (КЧ-5) обнаружена высокая положительная корреляция содержания ила и карбонатов с концентрацией $I_{\text{сол}}$. Для солончака квазиглееватого (КЧ-5) отмечена средняя отрицательная корреляция параметров $I_{\text{сол}}$ /ил и не установлено значимой корреляции с содержанием карбонатов и водорастворимого Na^+ .

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что почвы топокатены на древней террасе оз. Кучукское образуют геохимический ряд, в котором в указанной последовательности (чернозем текстурно-карбонатный < солонец < чернозем квазиглееватый < солончак) увеличивается степень засоления, горизонт максимальной аккумуляции солей приближается к поверхности и усиливаются признаки гидрогенной трансформации. При этом почвообразующие породы слабо- или не засолены. Такой характер профильного и пространственного распределения в почвах водорастворимых солей свидетельствует об их аккумуляции из грунтовых вод. В профиле почв присутствует также литогенная неоднородность. Тип почвы зависит от ее положения в микрорельефе и геохимическом ряду. Это обуславливает сложный характер педогенеза почв в озерных котловинах Кулундинской равнины и влияет на содержание и профильное распределение в них фтора (F) и йода (I).

Общее содержание F и его водорастворимой формы в изученных почвах находится в пределах тех количеств, что ранее были зафиксированы в Западной Сибири [20, 24, 25] и в других сибирских регионах [4, 16, 35, 39, 40]. Также оно на 14%

ниже среднего содержания $F_{\text{общ}}$ в почвах мира (320 мг/кг по [58]) и не превышает экологически допустимый уровень (ЭДУ). Лишь в солончаке, приуроченном к микропонижению, обнаружено количество $F_{\text{общ}}$ (541 мг/кг), превышающее ЭДУ (>500 мг/кг, по [20]). Таким образом, природное содержание F в солончаках может превышать ЭДУ, что фиксировалось ранее для почв других регионов [16, 20]. В изученных почвах выражена аккумуляция F на разной глубине: ближе всего к поверхности максимум его содержания расположен в солончаке, глубже всего — в черноземе стратифицированном. На аккумуляцию $F_{\text{общ}}$ в почвах влияет содержание ила, причем это влияние зависит от типа почвы и ее положения в микрорельефе. Связь параметров ил/ $F_{\text{общ}}$ постепенно усиливается от почвы микроповышения к почве микропонижения, о чем свидетельствует коэффициент корреляции. Для $F_{\text{вод}}$ выявлена обратная зависимость: корреляция между ним и илом в почвах закономерно уменьшается от микроповышения к микропонижению.

Также профильное распределение $F_{\text{общ}}$ в изученных почвах свидетельствует о его накоплении на карбонатном геохимическом барьере, что соответствует установленной ранее закономерности [20, 21, 30, 58]. В них аккумуляция $F_{\text{общ}}$ на этом барьере зависит от типа почв: в черноземе стратифицированном она слабая, в солонце — средняя, а в солончаке и черноземе квазиглееватом засоленном — сильная, что подтверждается увеличением коэффициента корреляции. Максимальная корреляция содержания $F_{\text{общ}}$ с содержанием ила, карбонатов и водорастворимого Na^+ характерна для солончака, что связано, по нашему мнению, с гидрогенным механизмом аккумуляции солей, в том числе F .

Распределение $F_{\text{вод}}$ по профилю почв имеет сложный характер и сходство с распределением $F_{\text{общ}}$. Зоны его аккумуляции в изученных почвах также хорошо выражены, повторяя закономерности для $F_{\text{общ}}$: на содержание $F_{\text{вод}}$ оказывает влияние тип почвы и ее положение в геохимическом ряду. Так, в черноземе стратифицированном при отсутствии гидрогенного засоления количество $F_{\text{вод}}$ в сильной степени зависит от содержания илистой фракции, что обусловлено взаимодействием галогена с глинистыми минералами [20, 24, 25, 40, 58, 62, 63]. Корреляционный анализ показал положительную связь высокой степени между содержанием карбонатов, водорастворимого Na^+ и количеством $F_{\text{вод}}$ в незасоленной почве, расположенной на микроповышении. При нарастании засоления эта связь ослабевает: значение коэффициента корреляции для $F_{\text{вод}}$ уменьшается в остальных почвах, особенно в солончаке, приуроченном к микропонижению.

Высокие значения коэффициента вариации свидетельствуют о значительной неоднородности изученных почв по содержанию F и особенно его водорастворимой формы. Это обусловлено влиянием на F в почвах Кулундинской равнины таких факторов, как содержание ила, наличие карбонатного геохимического барьера и, частично, водорастворимого Na^+ , а также сложным сочетанием этих факторов в каждой изученной почве.

Наши результаты не подтвердили имеющиеся в литературе сведения [38] о влиянии сульфатов, бикарбонатов и суммы солей (по результатам водной вытяжки) на содержание $F_{\text{вод}}$. Коэффициенты корреляции показали слабую зависимость содержания F и $F_{\text{вод}}$ от этих компонентов.

Содержание $I_{\text{общ}}$ (5.27–15.21 мг/кг) в изученных почвах соответствует нормальному уровню для континентальных условий по [18]. Однако это значительно больше, чем в зональных для данной территории каштановых почвах, содержащих 0–2.6 мг/кг I [21], или в других почвах внутриконтинентальных областей Сибири [23, 25, 28, 34]. Есть сведения, что в солончаках степного биота Западной Сибири может накапливаться до 35 мг/кг $I_{\text{общ}}$ [21]. Низкая вариабельность его содержания в изученных почвах катены свидетельствует об относительно однородных условиях, влияющих на накопление и распределение этого галогена.

Результаты свидетельствуют, что содержание $I_{\text{общ}}$ в почвах катены зависит от гранулометрического состава: в песчано-супесчаных горизонтах (как в верхней, так и в нижней частях профиля) оно ниже, чем в суглинистых, что соответствует установленным ранее закономерностям [9, 19, 20, 28, 57, 59, 64, 65]. Корреляция содержания $I_{\text{общ}}$ и содержания ила, карбонатов и водорастворимого Na^+ в среднем по почвам умеренная. Влияние типа почвы и ее положения в микрорельефе на содержание $I_{\text{общ}}$ не выявлено. Зависимость содержания $I_{\text{общ}}$ от содержания карбонатов средняя для каждой почвы в отдельности.

В отличие от $I_{\text{общ}}$ содержание $I_{\text{сол}}$ в почвах катены значительно варьирует, а профильное распределение имеет сложный характер. Количество $I_{\text{сол}}$ в верхних 50 см почвы уменьшается в ряду солончак > солонец > чернозем текстурно-карбонатный стратифицированный > чернозем текстурно-карбонатный квазиглееватый. В среднем по почвам катены корреляция содержания $I_{\text{сол}}$ с содержанием ила высокая, с содержанием карбонатов и водорастворимым натрием — умеренная.

Для трех изученных почв подтвердилась взаимосвязь содержания карбонатов и $I_{\text{сол}}$. Следует отметить, что I , связанный с карбонатами, считается легко мобилизуемой и потенциально биодоступной фракцией [48, 49]. Значительная корреляция между содержанием карбонатов в почве и

содержанием I установлена в ряде регионов [15, 19, 21, 25, 34, 48, 65, 69]. Возможно, это обусловлено рН [46, 49, 59], поскольку почвы, содержащие карбонаты, как правило, щелочные. Протекающие в щелочной среде реакции с участием анионов I приводят к образованию наиболее устойчивых йодид- и йодат-анионов [20, 59, 66, 69]. Есть мнение [49], что механизм удержания I в карбонатных почвах еще до конца не изучен.

Для солончака, приуроченного микропонижению, нет значимой корреляции содержания $I_{\text{сол}}$ с содержанием ила, карбонатов и водорастворимым натрием. Для остальных почв эти показатели имеют положительную корреляцию высокой степени. Учитывая, что максимальная концентрация общего I и $I_{\text{сол}}$ зафиксирована именно в солончаке, предполагаем здесь гидрогенный механизм аккумуляции I из грунтовых вод. Выпотной тип водного режима солончаков приводит к накоплению солей, в том числе соединений I , в верхней части профиля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В озерных котловинах Кулундинской равнины формируются почвы, характеризующиеся сложным характером педогенеза, в том числе гидрогенным соленакоплением и литогенной неоднородностью профиля. Это оказывает влияние на содержание и распределение в них фтора и йода. Так, по сравнению с зональными почвами здесь происходит аккумуляция этих галогенов, в том числе их подвижных форм.

Природное содержание $F_{\text{общ}}$ в почвах озерных котловин Кулундинской равнины чаще всего соответствует экологически допустимому уровню (500 мг/кг), однако в солончаках оно может превышать этот показатель. На аккумуляцию F в почвах влияет содержание ила и карбонатов. Это влияние зависит от типа почвы и ее положения по микрорельефу: оно увеличивается от чернозема стратифицированного, расположенного на микроповышении, к солончаку, приуроченному к микропонижению. Для $F_{\text{вод}}$ выявлена обратная зависимость: корреляция между содержанием его и ила в почвах закономерно уменьшается от микроповышения к понижению.

Подтверждено влияние на содержание общего F карбонатного геохимического барьера. Дополнительно установлено, что в изученных почвах аккумуляция общего F на этом барьере зависит от типа почвы. Влияние карбонатного барьера усиливается от чернозема стратифицированного к солончаку. В солончаке выявлена высокая положительная корреляция содержания общего F с содержанием ила, карбонатов и водорастворимого Na^+ .

Для почв, расположенных выше по микрорельефу, установлена высокая положительная корреляция содержания $F_{\text{вод}}$ с такими параметрами, как содержание ила и карбонатов. Эти показатели, как факторы влияния на содержание фтора и его подвижной формы, выявлены для многих почв мира [20, 39, 40, 52, 58, 62, 63]. Однако для почв более низких позиций рельефа эта связь значительно ослабевает, что свидетельствует об усилении влияния здесь других факторов.

Профильное и пространственное распределение содержания $I_{\text{общ}}$ в изученных почвах слабо дифференцировано. Обнаружено лишь его низкое содержание в поверхностных супесчаных слоях в черноземе текстурно-карбонатном стратифицированном. Установлена положительная корреляция средней степени содержания галогена с содержанием в почвах ила и карбонатов, средней и слабой степени — с содержанием катиона Na . Влияние типа почвы и ее положения в микрорельефе на содержание $I_{\text{общ}}$ не выявлено.

Для всех почв, кроме солончака, установлена взаимосвязь содержания $I_{\text{сол}}$ с содержанием ила, карбонатов и водорастворимого натрия. Для солончака значимой корреляции между вышеназванными параметрами не обнаружено.

Сложный характер педогенеза почв в озерных котловинах Кулундинской равнины, в том числе гидрогенное соленакопление различной степени, и литогенная неоднородность субстрата усложняют закономерности распределения общего содержания фтора и йода и их подвижных форм, обуславливают пространственную неоднородность и высокую вариабельность этих параметров, что необходимо учитывать при проведении региональных оценок статуса этих галогенов в почвах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Полевые работы и определение свойств почв выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-29-05085мк); лабораторные анализы по определению фтора и йода, а также подготовка статьи к публикации — по государственному заданию Института почвоведения и агрохимии СО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека. М.: Медицина, 1991. 496 с.
2. Вандакурова Е.В. Растительность Кулундинской степи. Новосибирск, 1950. 128 с.

3. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 234 с.
4. *Волошин Е.И.* Содержание и распределение водорастворимого фтора в почвах средней Сибири // *Агрохимия*. 2003. № 2. С. 65–73.
5. *Глазовская М.А.* Геохимические основы типологии и методики исследований в ландшафтах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. 200 с.
6. *Герасимов И.П., Иванова Е.Н.* Процесс континентального соленакопления в почвах, породах, подземных водах и озерах Кулундинской степи (Западная Сибирь) // *Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 1934. Т. IX. С. 100–136.
7. *Головкова Т.В., Краснова Н.М.* Определение валового фтора в почве с помощью ионселективного электрода // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 1988. Вып. 42. С. 19–22.
8. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1 : 1 000 000. Сер. Алтае-Саянская. Лист N-44 (Новосибирск). Объяснительная записка. СПб.: Карт. фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 392 с.
9. *Дибирова А.П., Салманов А.Б.* Содержание йода в почвах Дагестана // *Почвоведение*. 2004. № 5. С. 546–550.
10. *Добровольский В.В.* География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
11. *Донских И.В.* Влияние фтора и его соединений на здоровье населения (обзор данных литературы) // *Бюл. ВСНЦ СО РАМН*. 2013. № 3(91). Ч. 2. С. 179–185.
12. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
13. *Золотов Д.В., Николаева О.П., Черных Д.В.* Динамика атмосферного увлажнения западной части Алтайского края как характеристика климатогеоэкологического фона // *Изв. АлтГУ*. 2012. № 3–1(75). С. 119–125.
14. *Кашин В.К.* Биогеохимия, фитофизиология, агрохимия йода. Л.: Наука, 1987. 260 с.
15. *Кашин В.К., Иванов Г.М.* Йод в почвах Забайкалья // *Почвоведение*. 1991. № 11. С. 142–151.
16. *Кашин В.К., Афанасьева Л.В., Убугунов Л.Л.* Фтор в компонентах ландшафтов Западного Забайкалья // *Агрохимия*. 2015. № 10. С. 39–49.
17. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
18. *Ковальский В.В.* Биологическая роль йода // *Биологическая роль йода*. Научн. тр. ВАСХНИЛ. М.: Колос, 1972. С. 3–32.
19. *Конарбаева Г.А.* Йод в основных типах почв юга Западной Сибири // *Сиб. экол. журн.* 2001. № 3. С. 343–348.
20. *Конарбаева Г.А.* Галогены в почвах юга Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 200 с.
21. *Конарбаева Г.А.* Галогены в природных объектах юга Западной Сибири. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2008. 33 с.
22. *Конарбаева Г.А., Ермолов Ю.В.* К вопросу о целесообразности извлечения йода из почв нейтральным соевым раствором // *Агрохимия*. 2005. № 4. С. 67–72.
23. *Конарбаева Г.А., Смоленцев Б.А.* Пространственно-генетические особенности распределения йода в почвах Западной Сибири // *Агрохимия*. 2018. № 7. С. 85–96.
<https://doi.org/10.1134/S0002188118070074>
24. *Конарбаева Г.А., Смоленцева Е.Н.* Содержание и распределение фтора и брома в черноземах оподзоленных Горного Алтая // *Агрохимия*. 2022. № 2. С. 56–64.
<https://doi.org/10.31857/S0002188122020077>
25. *Конарбаева Г.А., Смоленцева Е.Н., Кравцов Ю.В.* Содержание и распределение йода и фтора в почвах Ишимской степи // *Агрохимия*. 2021. № 6. С. 57–64.
<https://doi.org/10.31857/S0002188121060077>
26. *Коробова Е.М., Березкин В.Ю., Корсакова Н.В., Кригман Л.В., Романов С.Л., Баранчуков В.С.* Йод в почвах и картофеле личных подсобных хозяйств Брянской и Гомельской областей, расположенных в зоне воздействия аварии на ЧАЭС // *Почвоведение*. 2019. № 10. С. 1234–1242.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19100058>
27. *Лебедева (Верба) М.П., Лопухина О.В., Калинина Н.В.* Особенности химико-минералогического состава солей в сорowych солончаках и озерах Кулундинской степи // *Почвоведение*. 2008. № 4. С. 467–480.
28. *Мальгин М.А.* Йод в почвах Алтая // *Почвоведение*. 1980. № 8. С. 74–81.
29. *Пансю М., Готеру Ж.* Анализ почвы. Справочник. Минералогические, органические и неорганические методы анализа. СПб.: ЦОП “Профессия”, 2014. 800 с.
30. *Перельман А.И.* Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 287 с.
31. *Побилат А.Е., Волошин Е.И.* Мониторинг йода в системе “почва–растение” (обзор) // *Вестник КрасГАУ*. 2020. № 10(163). С. 101–108.
<https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-10-101-108>
32. *Полевой определитель почв*. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
33. *Проскуракова Г.Ф., Никитина О.Н.* Ускоренный вариант кинетического роданидно-нитритного метода определения микроколичеств йода в биологических объектах // *Агрохимия*. 1976. № 7. С. 140–143.
34. *Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Балыкин Д.Н., Мешков Н.А.* Распределение йода в почвах Тувинской горной области // *Мир науки, культуры, образования*. 2007. № 3(6). С. 14–18.
35. *Пузанова О.Ю., Мальгин М.А., Пузанов А.В.* Педогеохимия фтора в сухостепных котловинах юго-восточного Алтая // *География и природные ресурсы*. 1996. № 2. С. 90–94.
36. *Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв*. М.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1990. 235 с.
37. *Савенко В.С.* Почвы как возможный источник фтора в атмосфере // *Геохимия*. 2018. № 9. С. 920–922.
<https://doi.org/10.1134/S0016752518090091>
38. *Савенко А.В., Савенко В.С.* О водорастворимом фторе почв // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 61–64.
<https://doi.org/10.1134/S000218811903013X>
39. *Танделов Ю.П.* Природное содержание водорастворимого фтора в почвах Красноярского края и

- техногенное загрязнение окружающей среды // Вестник КрасГАУ. 2007. Вып. 1. С. 97–110.
40. Танделов Ю.П. Фтор в системе почва–растение. Красноярск: РАСХН, 2012. 146 с.
 41. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шенина, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
 42. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. А.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
 43. Урусевская И.С., Алябина И.О., Винюкова В.П., Востоква Л.Б., Дорофеева Е.И., Шоба С.А., Щипухина Л.С. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. М-б 1 : 2500000. М., 2013. 16 л.
 44. Харламова Н.Ф., Силантьева М.М. Современное состояние и тенденции изменений климата Кулунды // Известия АлтГУ. 2011. № 3/2. С. 50–55.
 45. Ahmad S., Bailey E.H., Arshad M., Ahmed S., Watts M.J., Young S.D. Multiple geochemical factors may cause iodine and selenium deficiency in Gilgit-Baltistan // Pakistan. Environ. Geochem. Health. 2021. V. 43. P. 4493–4513.
<https://doi.org/10.1007/s10653-021-00936-9>
 46. Bowley H.E., Younga S.D., Anderb E.L., Crouta N.M.J., Watts M.J., Bailey E.H. Iodine bioavailability in acidic soils of Northern Ireland // Geoderma. 2019. V. 348. P. 97–106.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.020>
 47. Cox E.M., Arai Y. Environmental chemistry and toxicology of iodine // Adv. Agronomy. 2014. V. 128. P. 47–96.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00002-0>
 48. Duborska E., Bujdoš M.M., Urik P.M. Iodine fractionation in agricultural and forest soils using extraction methods // Catena. 2020. V. 195. P. 104749.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104749>
 49. Duborská E., Matulová M., Vaculovič T., Matuš P., Urik M. Iodine Fractions in Soil and Their Determination // Forests. 2021. V. 12. P. 1512.
<https://doi.org/10.3390/f12111512>
 50. Fuge R., Johnson C.C. Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review // Appl. Geochem. 2015. V. 63. P. 282–302.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.09.013>
 51. Gavrilov D.A., Smolentseva E.N., Saprykin O.I. Soils of lake depressions in the steppe biome of West Siberia as indicators of Holocene climate rhythms // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2021. P. 862.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/862/1/012005>
 52. Gupta R.K., Shhabra R., Abrol I.P. Fluorine adsorption behavior in alkali soils: Relative Roles of pH and Sod-icity // Soil Sci. 1982. V. 133. № 6. P. 364–368.
 53. Humphrey O.S., Young S.D., Bailey E., Crout N.M.J., Ander E.L., Watts M.J. Iodine soil dynamics and methods of measurement: A review // Environ. Sci. Process. Impacts. 2018. № 20. P. 288–310.
<https://doi.org/10.1039/C7EM00491E>
 54. Hu Q., Moran J.E., Blackwood V. Geochemical cycling of iodine species in soils // Lawrence Livermore National Lab. (United States). 2007. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/351779.pdf>
 55. IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, 2015. 192 p.
 56. Jensen H., Orth B., Reiser R., Bürge D., Lehto N.J., Almond P., Gaw S., Thomson B., Lilburne L., Robinson B. Environmental Parameters Affecting the Concentration of Iodine in New Zealand Pasture // J. Environ. Qual. 2019. V. 48. P. 1517–1523.
<https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0128>
 57. Johanson K.J. Iodine in soil. Swedish Nuclear Fuel and Waste management Company, 2000.
<https://skb.se/upload/publications/pdf/TR-00-21.pdf>
 58. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plant. London–N.Y.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. 548 p.
<https://doi.org/10.1017/S0014479711000743>
 59. Korobova E. Soil and landscape geochemical factors which contribute to iodine spatial distribution in the main environmental components and food chain in the central Russian plain // J. Geochem. Explor. 2010. V. 107. P. 180–192.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.03.003>
 60. Mohiuddin M., Irshad M., Farig M., Shahzad M. Extractability of iodine from soils using different methods in relation to soil properties // Arabian J. Geosciences. 2021. № 14. P. 374–383.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-06782-4>
 61. Muramatsu Y., Wedepohl K.H. The distribution of iodine in the Earth crust // Chem. Geol. 1998. № 147. P. 201–216.
 62. Omuetti J.A.J., Jones R.L. Fluorine distribution with depth in relation to profile development in Illinois // Soil Sci. Soc. Am. J. 1980. V. 44. № 2. P. 247–249.
 63. Perrott K.W., Smith B.F., Inkson R.H. The reaction of fluoride with soils and soils minerals // J. Soil Sci. 1977. V. 28. P. 58–67.
 64. Roulier M., Coppin F., Bueno M., Nicolas M., Thiry Y., Vedova C.D., Février L., Pannier F., Hécho I.L. Iodine budget in forest soils: Influence of environmental conditions and soil physicochemical properties // Chemosphere. 2019. V. 224. P. 20–28.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.060>
 65. Sheppard M.I., Thibault D.H. Chemical behavior of iodine in organic and mineral soils // Appl. Geochem. 1992. V. 7. P. 265–272.
[https://doi.org/10.1016/0883-2927\(92\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0883-2927(92)90042-2)
 66. Shetaya W.H., Young S.D., Watts M.J., Ander E.L., Bailey E.H. Iodine dynamics in soils // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 77. P. 457–473.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.10.034>
 67. Takeda A., Unno Y., Tsukada H., Takaku Y., Hisamatsu S. Speciation of iodine in soil solution in forest and grassland soils in Rokkasho, Japan // Radiat. Prot. Dosim. 2019. № 184. P. 368–371.
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncz103>
 68. Tikhomirov F.A., Kasparov S.V., Prister B.S., Sahnikov V.N. Role of organic matter in iodine fixation in soils // Soviet. Soil Science. 1980. № 12. P. 64–72.
 69. Zhang S., Xu C., Creeley D., Ho Y.F., Li H.P., Grandbois R., Santschi P.H. Iodine-129 and Iodine-127 speciation in groundwater at the Hanford site, US: iodate incorporation into calcite // Environ. Sci. Technol. 2013. № 47. P. 9635–9642.

Fluorine and Iodine in Soils of the Kulunda Plain

G. A. Konarbaeva¹ and E. N. Smolentseva^{1, *}

¹*Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: esmolenceva@issa-siberia.ru*

The content and distribution of fluorine (F) and iodine (I) have been studied using the example of a four soils located on the terrace of Kuchukskoye Lake in the Altai kray. Soil sections are located on various elements of the micro relief within the boundaries of the lake terrace. The textural-carbonate stratified chernozem (Calcic Chernozem (Loamic, Areninovic, Bathyraptic)) occupies the top of the micro relief. The Solonchak quasi-gleyed (Calcic Solonchak (Loamic, Sulphatic, Humic) is located in a micro-depression. The absolute difference in elevation between these soils is 1 m. Solonetz dark quasi-gleyed salted (Protosalic Solonetz (Loamic, Humic) and texture-carbonate quasi-gleyed salted (Calcic Gleyic Chernozem (Loamic, Endosalic) are confined to the slope between the Calcic Chernozem and Solonchak. The total content of halogens and their mobile forms were determined: water-soluble for F and salt-soluble for I. The content of total F in soils averaged 277.40 mg/kg (lim 59.83–541.10 mg/kg), water-soluble – 3.47 mg/kg (lim 0.04–16.45 mg/kg). Statistical calculations proved that the content of total F strongly correlates with the content of clay, carbonates and water-soluble sodium-cation, and the value of the correlation coefficient depends on the type of soil and its position on the micro relief. Water-soluble F has a high positive correlation with similar parameters in the Chernozem and in the Solonetz. The results showed that the content of total I in the studied soils is higher than in zonal soils of this territory, averages 13.61 mg/kg of soil (5.27–15.21 mg/kg) and moderately depends on the content of clay and carbonates. The influence of the soil type and its position on the micro relief was not revealed on the content of total I. The average content of salt-soluble I is 0.71 mg/kg (0.01–1.86 mg/kg). For all studied soils except Solonchak the relationship of the content of salt-soluble I with the content of clay, carbonates and water-soluble sodium cation has been established. No significant correlation between the above-mentioned parameters has been established for the Solonchak. The revealed heterogeneity of the spatial distribution of F and I in the studied soils should be taken into account when conducting regional assessments of the status of these halogens.

Keywords: halogens, saline soils, Chernozem, Solonets, Solonchak, Kuchukskoye Lake, Western Siberia