

УДК 631.416.3:631.472:631.483

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ МОНОМЕРОВ И ПОЛИМЕРОВ КРЕМНИЕВЫХ КИСЛОТ В СВЯЗИ С КИСЛОТНОСТЬЮ И ГУМУСИРОВАННОСТЬЮ ПОЧВ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ПО НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Козлов А.В., Уромова И.П.

*ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина», Нижний Новгород, e-mail: a.v.kozlov\_ecology@mail.ru*

В работе представлены результаты сравнительно-географического анализа некоторых химических показателей основных типов почв, встречающихся на территории Нижегородской области. В период 2017–2019 гг. в рамках летних полевых студенческих практик было заложено несколько почвенных разрезов в различных почвенно-климатических подзонах региона, в том числе разрезы типичной подзолистой и дерново-подзолистой почвы, а также разрезы типичной серой лесной почвы и типичного чернозема. Образцы с генетических горизонтов почв были проанализированы по показателям содержания гумуса, мономеров, полимеров кремниевых кислот и кислоторастворимого кремния, а также уровня актуальной и обменной кислотности на базе Эколого-аналитической лаборатории мониторинга и защиты окружающей среды и Лаборатории географии почв и геохимии ландшафтов Мининского университета. Было установлено, что среди трех исследованных форм кремния содержание мономерной формы минимально в почвах подзолистого типа, причем чем активнее развит в профиле подзолообразовательный процесс, тем меньше накопление мономеров кремния. Подобные тенденции прослеживались и в отношении полимеров кремниевых кислот и кислоторастворимых фракций Si. Наибольшее количество всех соединений кремния было установлено в почвах с развитым дерновым и гумусо-аккумулятивным процессами (типичные серые лесные почвы и типичные черноземы), что, по-видимому, связано не только со смещением водного режима территории в сторону непромытого типа, но также с накоплением гумусовых компонентов и снижением уровня кислотности в сторону нейтральной реакции. Подобные тенденции объясняют зависимость содержания подвижных соединений кремния в генетических горизонтах почвенных профилей от доминирующего почвообразовательного процесса.

**Ключевые слова:** мономеры и полимеры кремниевых кислот в профиле почвы, кислоторастворимые соединения кремния в почве, гумус, кислотность почвы, основные типы почв региона

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MONOMER CONTENT AND SILICON ACID POLYMERS DUE TO ACIDITY AND HUMUSINESS OF MAIN SOIL TYPES IN NIZHNY NOVGOROD REGION

Kozlov A.V., Uromova I.P.

*Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, e-mail: a.v.kozlov\_ecology@mail.ru*

The work presents results of comparative-geographical analysis of some chemical indicators of main soil types found in territory of the Nizhny Novgorod region. In the period 2017-2019, within the framework of summer field student practices, several soil sections were laid in various soil-climatic sub-areas of the region, including sections of typical sod-podzolic and cespitose sod-podzolic soil, as well as sections of typical grey forest soil and typical chernozem. Samples from the genetic horizons of soils were analyzed according to the content of humus, monomers, polymers of silicon acids and acid-soluble silicon, as well as the level of current and metabolic acidity on basis of the Ecological Analytical Laboratory for Monitoring and Protection of the Environment and the Laboratory of Soil Geography and Geochemistry of Landscapes of Minin University. It has been found, that among three forms of silicon studied, content of monomer form is minimal in the soils of the sod-podzolic type, and the more active the sod-podzolic process is developed in the profile, the less the accumulation of the silicon monomer. Similar trends have been observed with respect to silicon acid polymers and acid soluble Si fractions. The largest amount of all silicon compounds was found in soils with developed turf and humus-battery processes (typical grey forest soil and typical chernozem), which seems to be due not only to shift of water regime of the territory towards non-washing type, but also to the accumulation of humus components and decrease of level of acidity towards neutral reaction. Such trends explain dependence of content of movable silicon compounds in genetic horizons of soil profiles on dominant soil formation process.

**Keywords:** monomers and polymers of silicon acids in soil profile, acid-soluble silicon compounds in soil, humus, soil acidity, main soil types of the region

В настоящее время в научном обществе среди ученых геологов, биологов и почвоведов отношение к элементу кремнию до сих пор остается двояким. С одной стороны, данный элемент отнесен к разряду инертных по причине как значительной распро-

странности в земной коре и в почвах, так и высокой устойчивости к выветриванию. По этим причинам кремниевые соединения являются основными в составе большинства минералов, которые, в свою очередь, формируют скелет почвы и ее структурное

состояние [1, 2]. С другой стороны, соединения кремния и в особенности его растворимые и кислотные формы, наряду с фосфором, кальцием и магнием, относятся к элементам, обладающим высокой степенью подвижности и биогеохимической миграции в системах «почва – материнская порода», «почва – растение», «почва – вода», «вода – литологическая основа» [3, 4]. Данный факт определяет участие кремния и его соединений в различных геологических и биологических процессах.

В почвенном растворе постоянно присутствуют монокремниевые и поликремниевые кислоты, а также кремнийорганические соединения, которые обладают высокой химической и биологической активностью. В первом приближении физико-химический преобразование кремниевых соединений в почвах сводится к следующему. Мономеры кремниевых кислот образуются при постепенном растворении преимущественного аморфного (некристаллизованного) кремнезема, часть которых при условии наличия тонкодисперсных фракций (коллоидов) полимеризуется на их поверхности или в почвенном растворе. В свою очередь, полимеризация мономеров кремниевых кислот в коллоидной матрице происходит в диффузном слое, а в почвенном растворе данный процесс протекает только при условии значительно повышенной концентрации мономеров [3, 5]. Таким образом в почве происходит формирование динамического запаса мономеров и полимеров кремниевых кислот.

С точки зрения агрохимии интерес к кремнию как к элементу питания сельскохозяйственных культур берет свое начало еще со времен второй половины XIX в. с начальных исследований Юстуса фон Либиха на Ротамстедской опытной станции (Великобритания) и до сих пор не теряет своей значимости [6]. Причиной тому является отсутствие единого, комплексного представления о физико-химическом взаимодействии кремниевых веществ в почвах и их роли в системе «почва – растение», отдельно – в физиологии и биохимии растений и животных организмов, а также микроорганизмов, в том числе и почвообитающих, деструктурирующая функция которых, в свою очередь, имеет непосредственное отношение к динамике мономеров и полимеров кремниевых кислот в почве [7]. В настоящее время данные вопросы остаются актуальными [5, 7].

Агрономическая ценность активных кремниевых компонентов в почвах высока, поскольку те, усваиваясь культурными растениями, способствуют не только прямому

увеличению их урожайности и качества продукции, но также за счет физиологической оптимизации растительного организма повышают его устойчивость к неблагоприятным факторам агроэкотопа: перепады температурного фона, увлажненности дневных горизонтов почвы и воздуха; фитосанитарные условия; мера засоленности почвы и т.д. [8–10].

Известно, что комплекс почвообразовательных процессов, длительное время происходящих в сезонном динамическом равновесии в теле почвенного профиля, эволюционно сформировал его основные генетические горизонты, обладающие определенными качествами и свойствами [1, 11, 12]. В свою очередь, определенный набор базовых и переходных сформированных горизонтов определяет направление и интенсивность физико-химических и биохимических процессов, протекающих соответственно в почвенно-поглощающем и почвенно-биотическом комплексах индивидуального генетического слоя [4, 13]. В настоящее время в почвоведении нет единой и завершенной теории о функциях активных соединений кремния в указанных выше процессах и комплексах [3, 5, 8], что определяет научный интерес к теме и актуальность изучения данного вопроса.

Цель исследования: сравнительный анализ содержания монокремниевых и поликремниевых кислот, а также кислоторастворимых фракций кремния в генетических горизонтах основных типов почв средней полосы России в зависимости от показателей их кислотности и гумусированности.

#### Материалы и методы исследования

Исследованию подверглись почвы, расположенные в различных почвенно-климатических подзонах Нижегородской области [14, 15]:

1. Подзолистая типичная освоенная обычная глубокоподзоленная неоглеенная легкосуглинистая почва (Городецкий район).

2. Дерново-подзолистая освоенная обычная мелкоподзоленная неоглеенная легкосуглинистая почва (Уренский район).

3. Типичная серая лесная освоенная обычная слабоподзоленная слабосмытая среднесуглинистая почва (Перевозский район).

4. Чернозем типичный обычный среднемоночный среднегумусный слабосмытый легкосуглинистый (Сеченовский район).

Закладка и описание разрезов почвенных профилей, а также отбор и лабораторный анализ проб почвы с генетических горизонтов проводились в период 2017–2019 гг.

в рамках выездной полевой учебной практики по географии почв, проводимой со студентами-географами, и выездной полевой учебной эколого-географической практики, проводимой со студентами-экологами.

Образцы доставлялись в Эколого-аналитическую лабораторию мониторинга и защиты окружающей среды и Лабораторию географии почв и геохимии ландшафтов Мининского университета, где впоследствии анализировались на определение показателей актуальной и обменной кислотности потенциметрическим методом (ГОСТ 26483-85), содержания монокремниевых, поликремниевых кислот и кислоторастворимых фракций кремния спектрофотометрическим методом В.В. Матыченкова [3], а также содержания гумуса – по ГОСТ 26213-91.

**Результаты исследования и их обсуждение**

Данные табл. 1 и 2 отражают изменчивость показателей в генетических горизонтах почвенных профилей, в различной мере подвергшихся подзолообразовательному и иллювиальному процессам, а также

с разницей с активности гумусо-аккумулятивного ЭПП – типичной подзолистой глубокоподзоленной и дерново-подзолистой мелкоподзоленной легкосуглинистых почв.

Было установлено, что в процессе смены друг другом элювиально-иллювиальных горизонтов кислотность почвы существенно повышалась, причем в сильной мере – при более глубоком развитии подзолообразовательного процесса. Уровень значений рН, определенных из водной и солевой вытяжек, были выше в дерново-подзолистых почвах, что объясняется более выраженным дерновым процессом и меньшей интенсивностью процессов оподзоливания материнской породы. Вследствие данной вариабельности уровень накопления гумуса в почвах и его динамика вниз по профилю имели вполне четкое и закономерное распределение – большая часть гумусовых компонентов встречались в дневных горизонтах, затем шло плавное снижение их концентрации. При этом уровень концентрации гумуса оказался немного выше в почвах с развитым дерновым процессом.

**Таблица 1**

Показатели кислотности, гумусированности и содержания различных соединений кремния в типичной подзолистой глубокоподзоленной почве

№ п/п	Горизонт	Глубина, см	Кислотность, ед. рН			Соединения Si, мг/кг			Гумус, %
			рН <sub>вод.</sub>	рН <sub>сол.</sub>	ΔрН	моно-форма	поли-форма	кислото-раст.	
1	A <sub>ПАХ</sub>	0–25	5,35	5,11	0,24	3,1	7,7	65,0	1,65
2	A <sub>2</sub>	26–50	3,99	3,62	0,37	1,6	15,5	38,2	0,32
3	B <sub>1</sub>	51–80	3,82	3,38	0,44	2,8	10,9	73,7	0,53
4	B <sub>2</sub>	81–110	3,98	3,41	0,57	3,2	19,8	111,7	0,11
5	BC	111–125	3,84	3,58	0,26	4,6	18,3	77,5	0,06

**Таблица 2**

Показатели кислотности, гумусированности и содержания различных соединений кремния в дерново-подзолистой мелкоподзоленной почве

№ п/п	Горизонт	Глубина, см	Кислотность, ед. рН			Соединения Si, мг/кг			Гумус, %
			рН <sub>вод.</sub>	рН <sub>сол.</sub>	ΔрН	моно-форма	поли-форма	кислото-раст.	
1	A <sub>ПАХ</sub>	0–16	5,79	5,52	0,27	4,9	12,7	86,2	2,83
2	A <sub>2</sub>	17–20	4,24	4,08	0,16	2,8	26,1	47,5	0,96
3	B <sub>1</sub>	21–48	4,66	4,20	0,46	4,3	19,9	58,2	0,40
4	B <sub>2</sub>	49–85	4,07	3,72	0,35	5,6	32,8	162,5	0,34
5	BC	86–125	3,99	3,40	0,59	4,7	14,6	97,5	0,17
6	C	126–175	4,37	3,65	0,72	6,1	11,8	102,9	0,11

В исследовании было выявлено, что среди всех изученных профилей в почвах подзолистого ряда содержится минимальное количество обеих водорастворимых фракций кремния – мономеров и полимеров. При этом, несмотря на значительное содержание валового кремния в элювиальных горизонтах ( $A_2$ ), представленного в основном инертным кварцем и полевыми шпатами, количество его растворимых соединений присутствовало в минимальном количестве.

С продвижением вниз по профилю накопление моно- и полимерных форм растворимого кремния повышалось вплоть до почвообразующей породы, чему причиной являются ярко выраженные иллювиальные процессы почв подзолистого ряда. Наибольший уровень концентрации данных соединений присутствовал в нижней части горизонта  $B_2$ , в котором происходит интенсивное накопление вымываемого сверху вещества.

Содержание кислоторастворимых соединений кремния также уменьшалось в области интенсивного оподзоливания, но к иллювиальной зоне увеличивалось до уровня выше, чем в гумусо-аккумулятивных горизонтах.

Критерий  $\Delta pH$ , показывающий разницу значений между актуальной и обменной кислотностью почв, косвенно свидетельствует о наличии определенной емкости катионного обмена, который в области интенсивного развития подзолообразовательного процесса профилей подзолов (табл. 1 и 2) имел разный уровень значений. В профиле типичных подзолов данный показатель был выше в горизонте  $A_2$  относительно значения дневного горизонта, однако в профиле дерново-подзолистой почвы  $\Delta pH$  оказался самым минимальным из всех, после которого он повышался вниз по профилю. В иллювиальных слоях данный показатель был одинаково высоким относительно зна-

чений по дневным горизонтам. Подобные тенденции прямым образом подтверждают элювиально-иллювиальное распределение вещества, доминирующее в профилях почв, которые встречаются на территории промывного водного режима, а также свидетельствуют о выносе мелкодисперсных обменно-активных частиц, коллоидов, кальция и магния вниз по профилю.

Изменение показателей в генетических горизонтах профилей почв дернового ряда представлено в табл. 3 и 4. Данные почвы образованы на нейтральных или карбонатных тяжелых породах, в их профилях преобладают дерновый и гумусо-аккумулятивный процессы, а элювиальный вынос вещества либо сведен к минимуму, либо практически отсутствует.

При анализе показателей актуальной и обменной кислотности почв четко отслеживается намеченная выше закономерность. В профиле типичных серых лесных почв с продвижением до горизонта  $B_2$  кислотность повышалась, в этом горизонте значение  $pH$  становилось минимальным, после чего шло резкое увеличение значений вплоть до материнской породы, которая уже характеризовалась слабощелочной реакцией.

В профиле черноземов типичных подобной закономерности не наблюдалось по причине замедленной вертикальной миграции вещества из-за непромывного водного режима местности, а также за счет значительной карбонатности почвообразующих пород. Здесь показатели актуальной и обменной кислотности стабильно повышались с продвижением вниз по профилю, а значение  $\Delta pH$  было максимально в нижней части гумусо-аккумулятивного горизонта и сопоставимо со значением материнской породы. Данные тенденции показывают классический пример преобладания дернового и гумусо-аккумулятивного процессов в черноземах, образованных на карбонатных отложениях.

Таблица 3

Показатели кислотности, гумусированности и содержания различных соединений кремния в типичной серой лесной почве

№ п/п	Горизонт	Глубина, см	Кислотность, ед. pH			Соединения Si, мг/кг			Гумус, %
			$pH_{\text{вод}}$	$pH_{\text{сол}}$	$\Delta pH$	моно-форма	поли-форма	кислото-раст.	
1	$A_{\text{ПАХ}}$	0–20	6,46	5,90	0,56	7,4	25,8	91,2	3,42
2	$BA_2$	21–35	5,77	5,35	0,42	11,6	36,4	275,6	1,07
3	$B_1$	36–60	6,52	6,05	0,47	9,1	21,5	227,6	0,52
4	$B_2$	61–81	4,87	4,42	0,45	16,8	46,0	257,3	0,21
5	$B_3$	82–111	6,03	5,37	0,66	13,5	30,1	240,2	0,13
6	BC	112–130	7,17	6,93	0,24	8,2	18,4	225,8	0,07

**Таблица 4**

Показатели кислотности, гумусированности и содержания различных соединений кремния в черноземе типичном

№ п/п	Горизонт	Глубина, см	Кислотность, ед. рН			Соединения Si, мг/кг			Гумус, %
			pH <sub>вод.</sub>	pH <sub>сол.</sub>	ΔpH	моно-форма	поли-форма	кислото-раст.	
1	A <sub>1</sub> '	0–26	6,33	5,77	0,56	18,3	9,1	243,9	7,60
2	A <sub>1</sub> "	27–54	6,49	5,87	0,62	24,4	19,5	295,0	6,83
3	B <sub>1</sub>	55–88	7,32	7,04	0,28	43,6	25,7	332,4	5,73
4	BC	89–103	7,80	7,25	0,55	23,1	15,4	166,2	2,16
5	C	104–129	7,92	7,32	0,60	14,6	10,2	145,1	0,23

Содержание мономеров и полимеров кремниевых кислот в профиле типичной серой лесной почвы имело некоторую дифференциацию относительно горизонта B<sub>1</sub> – накопление данных форм кремния было сосредоточено в вышележащем переходном горизонте BA<sub>2</sub> (по-видимому, за счет начала элювиальных процессов в вертикали профиля), а наибольшая концентрация моно- и полимеров кремния сосредотачивалась в середине иллювиальной толщи (горизонт B<sub>2</sub>).

В профиле же типичного чернозема общее накопление водорастворимых фракций кремния было немного меньше, чем в профиле типичных серых лесных почв, и не имело двойного распределения в верхних горизонтах профиля. Здесь присутствовала стабильная миграция мономеров и полимеров кремниевых кислот с последующим их накоплением в иллювиальном горизонте B<sub>1</sub>.

Кроме того, нужно отметить, что среди всех рассматриваемых профилей в каждом генетическом горизонте профиле чернозема общий уровень содержания мономеров кремниевых кислот оказался выше уровня содержания поликремниевых кислот, что, по-видимому, было обусловлено удержанием процесса полимеризации моноформ кремниевых соединений за счет запасов влаги и наличия специфических органических веществ.

Относительно кислоторастворимых соединений кремния нужно сказать, что тенденция их распределения по профилям чернозема и серой лесной почвы была идентична тенденции распределения водорастворимых фракций, однако уровень концентрации данных соединений стабильно выше в почве верхних горизонтов чернозема, чем серой лесной почвы.

**Заключение**

В результате проведенных исследований было установлено, что сильная вы-

раженность подзолообразовательного процесса в профиле почв не способствует накоплению как мономерных, так и полимерных фракций кремниевых кислот. Иными словами, доминирующие в генезисе элювиальные процессы эволюционно способствовали избыточной вертикальной миграции многих компонентов из дневных горизонтов, в том числе и растворимых соединений кремния.

Содержание поликремниевых кислот в профилях изученных почв проявляет закономерность увеличенного количества относительно содержания монокремниевых кислот за исключением профиля чернозема типичных, в горизонтах которых мономерных форм кремния несколько больше, чем полимерных. Данная тенденция, по-видимому, обусловлена значительным запасом органических веществ в черноземах и преобладанием кальция и магния в ППК, которые способствуют удержанию большого количества свободной воды. В свою очередь данные обстоятельства не позволяют мономерам кремниевых кислот подвергаться полимеризации, что сохраняет их в активной моноформе.

В профилях почв подзолистого типа четко прослеживается элювиально-иллювиальная дифференциация вещества, в том числе и кислоторастворимых фракций кремния. В почвах дернового и гумусо-аккумулятивного ЭПП такая тенденция либо выражена слабо, либо практически отсутствует по причине нейтральности среды за счет повышающихся показателей актуальной и обменной кислотности вплоть до слабощелочной реакции.

**Список литературы**

1. Козловский Ф.И. Теория и методы изучения почвенного покрова. М.: ГЕОС, 2003. 536 с.
2. Савич В.И., Седых В.А., Гераськин М.М. Охрана почв. М.: Проспект, 2016. 352 с.

3. Матыченков И.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В. Подвижные кремниевые соединения в системе почва – растение и методы их определения // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2016. № 3. С. 37–46.
4. Муха В.Д. Естественно-антропогенная эволюция почв (общие закономерности и зональные особенности). М.: КолосС, 2004. 271 с.
5. Чао Л., Кси Б., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П. Влияние недостатка увлажнения и повышенного содержания соли на кремниевое состояние почв Европейской части России и Центрального Китая // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2018. № 3. С. 16–22.
6. Кирюшин В.И. Агрономическое почвоведение. М.: КолосС, 2010. 687 с.
7. Kozlov A.V., Uromova I.P., Kuposova N.N., Novik I.R., Vershinina I.V., Avdeev Yu.M., Khamitova S.M., Naliukhin A.N., Kostin A.E., Mokretsov Yu.V. Optimization of the productivity of agricultural crops at application of natural minerals as ameliorants and mineral fertilizers on sod-podzolic soils. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2018. T. 10. № 3. P. 677–680.
8. Козлов А.В., Уромова И.П. Оценка агроэкологического состояния чернозема оподзоленного в условиях агроэкосистемы юга Нижегородской области // Успехи современного естествознания. 2018. № 12. С. 63–69.
9. Уромова И.П. Агробиологическое и экологическое обоснование приемов возделывания картофеля, полученного методом апикальной меристемы, в условиях Волго-Вятского региона: дис. ... докт. сел.-хоз. наук. Брянск, 2009. 330 с.
10. Уромова И.П. Повышение биопотенциала картофеля с использованием биопрепаратов // Плодородие. 2008. № 4 (42). С. 28–29.
11. Дзюин А.Г. Влияние систем удобрений в длительном стационаре на продуктивность севооборота и агрохимические показатели почвы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 5. С. 103–108.
12. Наумов В.Д. География почв. Почвы России. М.: Проспект, 2016. 344 с.
13. Шапорина Н.А., Чичулин А.В., Чумбаев А.С. Пространственная вариабельность водно-физических свойств темно-серой лесной почвы в условиях Предсалаирья // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 10. С. 144–149.
14. Никитин Б.А., Гогмачадзе Г.Д. Пахотные почвы Нижегородской области. Н. Новгород: Типография Нижегородского государственного университета, 2003. 176 с.
15. Полякова Н.В., Володина Е.Н., Платонычева Ю.Н. Рабочая классификация почв Нижегородской области. Н. Новгород: Нижегородская ГСХА, 2017. 64 с.