

Оригинальная статья / Original article

УДК 635.24 : 542.06

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-299-309>



Состав неорганических компонентов стеблей топинамбура

© А.В. Ковехова^{***}, О.Д. Арефьева^{***},
Н.А. Диденко^{**}, Л.А. Земнухова^{**}

^{*}Дальневосточный федеральный университет,
г. Владивосток, Российская Федерация

^{**}Институт химии ДВО РАН,

г. Владивосток, Российская Федерация

Резюме: Приведены результаты исследования неорганических компонентов в экстрактах стеблей топинамбура, полученных при различных значениях pH, и образцах золы. Установлено, что природа экстрагента оказывает значительное влияние на выход экстрактивных веществ из измельченных стеблей: наибольший выход (45%) достигается действием раствора гидроксида натрия, минимальный (31%) – дистиллированной воды. Как показали данные атомно-абсорбционного анализа, основными ионами в экстрактах, полученных в разных средах, являются ионы калия, кальция, натрия, магния и железа. Массовая доля золы после обработки стеблей растворами при разных значениях pH изменяется от 0,4 до 2,3%. Наименьшим выходом золы характеризуется образец стеблей после экстракции кислотой. По данным энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии во всех образцах золы содержатся преимущественно соединения K, Ca, Si и P. Наиболее высокое содержание кремния в золе стеблей наблюдается после кислотного гидролиза, что позволяет использовать ее в качестве кремнийсодержащего материала. Также были исследованы зольные компоненты сердцевин и внешней части стебля в сравнении с исходным образцом. По характеру термического разложения исходный образец и внешняя оболочка сходны между собой и отличаются от сердцевин. Зольность исходного образца составляет 4,3%, при этом зольность сердцевин стебля выше, чем внешней оболочки ~ в 2 раза (7 и 3,8% соответственно). Результаты ИК-спектроскопии показали, что характер расщепления полос в ИК-спектрах образцов золы зависит от части стебля и предварительной обработки сырья при разных значениях pH. В золе исходного образца, сердцевин, внешней оболочки, а также в золе остатков после водного и щелочного гидролиз стебля присутствуют полосы поглощения карбонатных групп. В ИК-спектрах золы стебля после кислотной обработки наблюдаются полосы поглощения, характерные для аморфного диоксида кремния. По данным рентгенофазового анализа изученные образцы золы находятся в аморфно-кристаллическом и кристаллическом состоянии, проведена идентификация фаз.

Ключевые слова: стебли топинамбура, зола, экстрактивные вещества, неорганические компоненты

Для цитирования: Ковехова А.В., Арефьева О.Д., Диденко Н.А., Земнухова Л.А. Состав неорганических компонентов стеблей топинамбура. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 2. С. 299–309. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-299-309>

Composition of inorganic components in *Helianthus tuberosus* stems

Anna V. Kovekhova^{***}, Olga D. Arefieva^{***},
Nina A. Didenko^{**}, Liudmila A. Zemnukhova^{**}

^{*}Far Eastern Federal University,
Vladivostok, Russian Federation

^{**}Institute of Chemistry Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russian Federation

Abstract: This article studies inorganic components in *Helianthus tuberosus* stems. Ash samples and extracts obtained at different pH values were examined. It is established that the extractant's nature has a significant effect on the yield of extractive substances from the ground stems: the greatest (45%) and the minimum (31%) yield was achieved by sodium hydroxide and distilled water, respectively. According to atomic

absorption spectrometry, the main ions in the extracts obtained in different media are those of potassium, calcium, sodium, magnesium and iron. Following treatment of stems with solutions having different pH values, the mass fraction of ash varied from 0.4 to 2.3%. The smallest ash yield was observed for a stem sample after acid extraction. According to energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry, all ash samples contained predominantly K, Ca, Si and P compounds. Acid hydrolysis produced the highest level of Si in samples, which allows this ash to be used as a silicon-containing material. The ash components of the core and outer part of the stem were compared with the initial sample. According to the nature of thermal decomposition, the initial sample and the outer shell were similar between themselves, though differing from the core. The ash content of the initial sample was 4.3%, with the ash content of the stem core being ~2 times higher than that of the outer shell (7 and 3.8%, respectively). The results of IR spectroscopy showed that splitting of bands in the IR spectra of ash samples depend on the part of the stem and the pre-treatment of raw materials at different pH values. The ash of the initial sample, core and outer shell, as well as the ash of the residues after the aqueous and alkaline hydrolysis of the stem, showed the absorption bands of carbonate groups. The IR spectra of the stem ash after acid extraction contained absorption bands characteristic of amorphous silicon dioxide. According to the conducted X-ray analysis, the studied ash samples were in an amorphous-crystal and crystalline state. The identification of phases was carried out.

Keywords: *Helianthus tuberosus* stems, ash, extractive substances, inorganic components

For citation: Kovekhova AV, Arefieva OD, Didenko NA, Zemnukhova LA. Composition of inorganic components in *Helianthus tuberosus* stems. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(2):299–309. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-299-309>

ВВЕДЕНИЕ

Топинамбур (*Helianthus tuberosus* L.), или подсолнечник клубненосный – это вид однолетних травянистых клубненосных растений с высокой урожайностью, которую составляют зеленая масса (около 40 т/га) и клубни (около 50 т/га). Все возрастающий интерес диетологов и фармацевтов к этой сельскохозяйственной культуре связан в первую очередь с тем, что в ней, как и во многих других растениях (например, цикорий, лук, чеснок, спаржа), в большом количестве содержится инулин – органическое вещество из группы полисахаридов. Главная ценность инулина, находящегося в основном в клубнях растений, – в его пребиотических свойствах.

Инулин – вещество природного происхождения, не имеющее аналогов искусственного производства. Он легко усваивается организмом человека, при этом укрепляет иммунитет, улучшает работу пищеварительной системы, способствует снижению уровня холестерина в крови и снижает риск развития онкологических заболеваний. В связи с этим инулин используют для обогащения пищевых продуктов (молочных, кондитерских и хлебобулочных изделий и др.) пищевыми волокнами, а также в качестве сахарозаменителя, поскольку он имеет природный сладкий вкус [1].

Вегетативная часть растения, в том числе стебли, также представляет интерес как возобновляемое сырье разного назначения – для производства сорбентов, кормов, органических веществ, композитных материалов и топливных брикетов. Стебель растения можно разделить на внутреннюю часть – сердцевину белого цвета (14,4% по массе), и наружную – одревесневшую часть желтовато-коричневого цвета (85,6% по массе). Наружная часть стебля топинамбура бо-

лее твердая, так как в ней содержится больше полисахаридов (60,6%), чем в сердцевине (42,4%) [2, 3].

Стебли топинамбура имеют разнообразные области применения. Они служат кормом сельскохозяйственным животным как в виде зеленой подкормки, так и в силосованном виде [4, 5]. Стебли также могут использоваться как природный, дешевый и простой в получении сорбент для очистки водных растворов от ионов тяжелых металлов (например, меди [6]) и красителей [7]. Внутренняя часть стебля, благодаря своей микропористой структуре, проявляет сорбционную активность в отношении ионов меди [8], цинка, кадмия и железа [9], а также анионных красителей, таких как кислотный красный и прямой бордо, применяемых на предприятиях текстильной промышленности [10].

Химический состав вегетативной части топинамбура зависит от времени отбора [2] и части стебля [11]. Органическая составляющая стеблей представлена в основном веществами углеводной природы, сырым протеином, клетчаткой и жирами [2, 12], что позволяет их использовать для получения полезных органических веществ после химической переработки. Например, для производства целлюлозы, глюкозо-фруктозного сиропа [2, 13], биобутанола [14] и биоэтанола [15]. Выход биоэтанола на углеводсодержащем субстрате из стеблей топинамбура выше, чем на субстратах древесного происхождения [12]. Биоэтанол, полученный из стеблей топинамбура, можно использовать в пищевой, энергетической и фармацевтической промышленности [16]. Продукты из стеблей топинамбура также находят свое применение в медицине для получения биомаркеров опухолевых клеток за счет детектирования содержания молочной кисло-

ты, накапливающейся в них [17].

Измельченные стебли топинамбура способны заменить древесину в качестве сырья для производства цементно-стружечных композитов [18]. Из стеблей топинамбура можно производить топливные брикеты и гранулы для систем децентрализованного теплоснабжения животноводческих ферм и сельских потребителей [19].

Неорганический состав стеблей топинамбура изучен лишь в отдельных работах. Показано, что в сухой зеленой массе в большом количестве содержатся калий, кальций, магний [2]. При использовании топинамбура в качестве фиторемедианта распределение металлов происходит по разным частям этого растения. В клубнях накапливается больше стронция, в стеблях - титана, марганца и ванадия, а в листьях больше железа, цинка, хрома, никеля и кобальта [20]. Но в литературе отсутствуют систематические сведения о неорганических компонентах, которые необходимы для определения направлений утилизации стеблей топинамбура. Поэтому в данной работе был изучен состав неорганических компонентов как в золе, так и в экстрактах стеблей топинамбура при различных значениях pH.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования использовали образцы стеблей топинамбура (*Helianthus tuberosus*) (ТС), отобранные в Яковлевском районе Приморского края. Стебли высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали до размера частиц 1–5 мм. Был исследован неорганический состав экстрактов, полученных из ТС при разных значениях pH, состав их зольных остатков и зола исходного образца.

Экстракция образцов стебля при разных значениях pH. Навеску измельченных стеблей топинамбура помещали в термостойкий стакан, добавляли дистиллированную воду, раствор соляной кислоты (0,1 моль/л) или гидроксида натрия (0,1 моль/л) в соотношении Т:Ж = 1:13. Гидролиз проводили при нагревании до 90 °С с контролером температуры ЕКТ Hei-Con (Heidolph, Германия) в течение 1 ч при перемешивании. Твердый остаток отфильтровывали через фильтровальную бумагу «синяя лента», промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции среды и высушивали.

Окислительный обжиг образцов стебля. Окислительному обжигу подвергались следующие образцы: исходный, состоящий из сердцевины и внешней части; сердцевина; внешняя часть; остатки исходного стебля после водного, кислотного и щелочного гидролиза.

Окислительный обжиг проводили в течение 3 ч в муфельной печи при 600 °С. Перед обжигом образцы карбонизировали в фарфоровой чашке на плите при температуре 300–400 °С.

Методы исследования образцов. ИК-спектры регистрировали на спектрометре Vertex 70

(Bruker, Германия) в области 400–4000 см⁻¹ по стандартным методикам с предварительным прессованием таблеток образца с KBr.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили по методу Брегг – Брентано в Cu K_α-излучении на дифрактометре Bruker D8 Advance (Германия). Идентификация фаз в экспериментальных рентгенограммах проведена с использованием программы EVA банка порошковых данных PDF.

Элементный анализ золы проводился методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре EDX 800 HS (Shimadzu, Япония).

Содержание ионов металлов в экстрактах определяли атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре AA-6601F (Shimadzu, Япония) в режиме пламенного атомно-абсорбционного анализа.

Термограммы исследуемых образцов записывали на дериватографе системы Ф. Паулик, И. Паулик и Л. Эрдей марки Q-1000 (МОН, Венгрия) на воздухе в интервале 20–700 °С со скоростью 5 град/мин. Навеска составляла 40–90 мг. В качестве эталона использовали прокаленный Al₂O₃.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование экстрактивных веществ стеблей топинамбура. Результаты исследования показали, что природа экстрагента оказывает значительное влияние на выход экстрактивных веществ из стеблей топинамбура, а также их зольных остатков после экстракции в разных средах. Установлено, что наибольший выход экстрактивных веществ (45%) достигается действием на измельченные стебли топинамбура 0,1 М раствора гидроксида натрия, а минимальный (31%) – дистиллированной воды (табл. 1).

Таблица 1. Содержание растворимых веществ в стеблях топинамбура после экстракции при разных значениях pH

Table 1. Content of soluble substances in jerusalem artichoke stems after extraction at different pH values

Экстрагент	Выход экстрактивных веществ, %	Цвет фильтрата
H ₂ O	31	светло-коричневый
HCl, 0,1 н.	42	светло-желтый
NaOH, 0,1 н.	45	темно-коричневый

Цвет фильтрата меняется от светло-желтого (кислотный гидролиз) до темно-коричневого (щелочной гидролиз). Изменение цвета и увеличение выхода экстрактивных веществ в большей степени связано с удалением лигнина из биомассы и частичным гидролизом гемицеллюлозы и полисахаридов.

Содержание ионов металлов, идентифици-

рованных в водных, кислотных и щелочных экстрактах, представлено в табл. 2. Основными ионами, присутствующими в исследуемых экстрактах, являются ионы калия, кальция, натрия, магния и железа. Наибольшее количество ионов металлов, входящих в состав ТС, экстрагируется соляной кислотой.

При сравнении содержания катионов металлов в экстрактах стеблей топинамбура и подсолнечника (близкого родственника топинамбура) следует отметить, что в экстрактах стеблей подсолнечника содержится большее количество катионов металлов, за исключением кальция (см. табл. 2).

Исследование зольных образцов стеблей топинамбура. Термическое разложение образцов стеблей топинамбура (исходный, сердцевина и внешняя оболочка) изучали в температурном интервале 20–600 °С (рис. 1). Термоокислительная деструкция (ТОД) всех образцов, сопровождающаяся экзоэффектами на кривой ДТА, происходит в несколько стадий.

В интервале температур 40–150 (170) °С на

кривых ДТА трех образцов наблюдается слабо-выраженный эндотермический эффект, объясняемый удалением связанной (адсорбированной) воды. При этом убыль массы (Δm) исходного образца и внешней оболочки составляет 4,4 и 4,9% соответственно, а Δm сердцевины – 8,8% (более гигроскопичная часть) (табл. 3).

Второй этап разложения исходного образца и внешней части стебля в интервале 150–230 °С обусловлен ТОД органических компонент, присутствующих в этих образцах в большей степени, чем в сердцевине, и перекрывается с началом термоокислительной деструкции целлюлозы.

Значительная потеря массы (40–41,5%) происходит в области температур 230–360 °С (третья стадия). Для исходного образца и внешней оболочки это связано с интенсивной ТОД целлюлозы как основного компонента указанных образцов. При нагревании сердцевины до 370 °С убыль массы выше и составляет 73,7%, что свидетельствует о большем выходе летучих веществ и указывает на меньшую стойкость органических компонент сердцевины по отношению к кислороду.

Таблица 2. Содержание ионов металлов в экстрактах из стеблей топинамбура

Table 2. Content of metal ions in extracts from jerusalem artichoke stems

Экстрагент	Содержание ионов, мкг/л				
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Fe ³⁺
Стебли топинамбура					
H ₂ O	900,0	83,0	19,6	3,9	0,2
HCl, 0,1 М	921,0	377,0	46,7	29,0	12,0
NaOH, 0,1 М	840,0	67,0	21,0	2301,0*	0,6
Стебли подсолнечника					
H ₂ O	2500,0	46,9	154,0	26,6	0,2
HCl, 0,1 М	2566,0	315,0	381,0	63,0	2,5
NaOH, 0,1 М	2102,0	23,0	128,0	1925*	0,2

*Высокое содержание ионов натрия в экстракте обусловлено составом экстрагента.

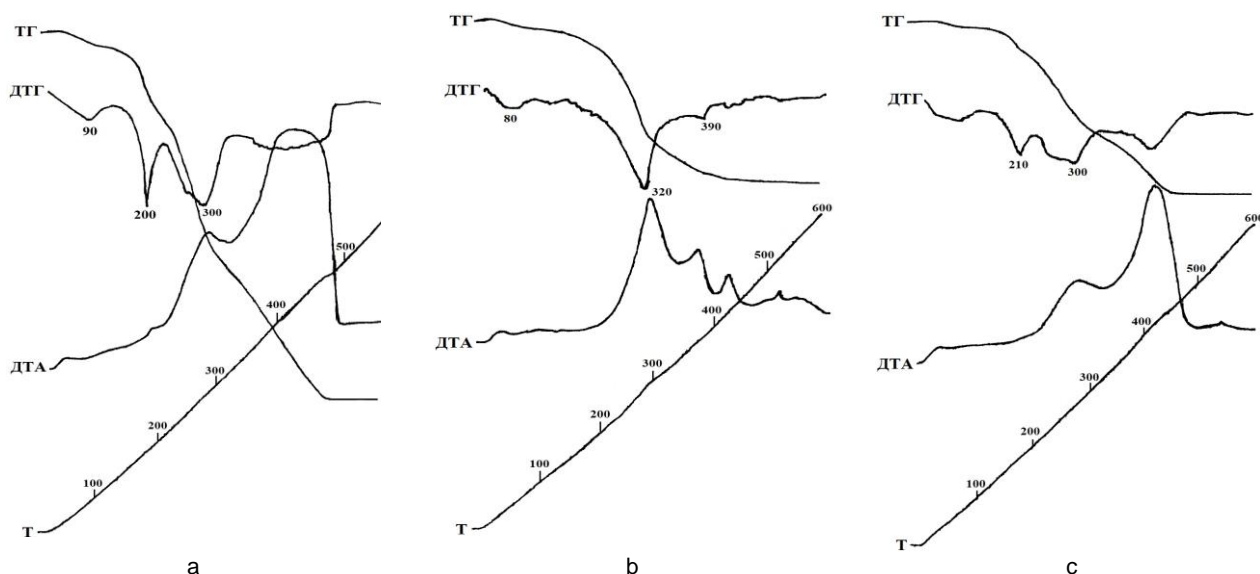


Рис. 1. Термограммы образцов стебля топинамбура:
а – исходный образец; б – сердцевина; с – внешняя часть

Fig. 1. Thermograms of jerusalem artichoke stem samples
a – the initial sample; b – the core; c – the outer part

Таблица 3. Убыль массы (Δm) исследованных образцов в зависимости от температуры

Table 3. Mass loss (Δm) of the studied samples as a function of temperature

Образец	Интервал температур, °C	$\Delta m, \%$
Исходный	40–150	4,4
	150–230	17,8
	230–360	40,0
	360–600	32,3
Сердцевина	40–170	8,8
	170–370	73,7
	370–600	11,3
Внешняя часть	40–160	4,9
	160–230	17,0
	230–360	41,5
	360–600	31,7

Четвертая стадия в области 360–500 °C связана с выгоранием карбонизованного (обогащенного углеродом) остатка, которого образуется значительно меньше в случае ТОД сердцевин (11,3%).

Зольность образца ТС составляет 4,3% (табл. 4), что согласуется с данными, приведенными в работе [2]. Зольность сердцевин превышает зольность внешней оболочки в 2 раза. Зола сердцевин окрашена в белый цвет в отличие от золы исходного образца ТС и внешней оболочки, которые окрашены в серый цвет.

Таблица 4. Содержание зольных компонентов в разных частях стеблей необработанного топинамбура

Table 4. Content of ash components in different parts of the stems of untreated jerusalem artichoke

Образец ТС	Зольность, %	Цвет золы
Исходный	4,3	серый
Сердцевина	7,0	белый
Внешняя оболочка	3,8	серый

Массовая доля золы остатков стеблей исходного образца топинамбура, подвергавшихся воздействию воды, кислоты и щелочи, изменяется от 0,4 до 2,3%. Высокая зольность образца после щелочной экстракции также обусловлена используемым экстрагентом.

Наименьшим выходом золы характеризуется образец после кислотного гидролиза, в гидролизате которого наблюдается наибольшее содержание металлов (см. табл. 2).

По данным рентгенофлуоресцентного анализа, предварительная обработка стеблей водой, соляной кислотой и щелочью влияет на состав золы.

Таблица 6. Содержание химических элементов в золе стеблей топинамбура

Table 6. Content of chemical elements in the ash of jerusalem artichoke stems

Образец золы стеблей	Содержание, %						
	K ₂ O	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MgO	SO ₂
Исходный	50,1	22,7	8,5	10,5	1,6	3,0	3,45
Сердцевина	29,9	56,1	3,7	2,8	1,6	4,1	0,6
Внешняя оболочка	55,9	21,0	10,5	6,6	1,7	1,9	1,2
После водного гидролиза	39,3	39,1	6,1	4,4	3,2	3,8	1,9
После кислотного гидролиза (0,1 M HCl)	14,7	8,2	58,4	8,4	3,7	0,4	3,9
После щелочного гидролиза (0,1 M NaOH)	11,1	35,7	1,5	2,0	42,6	4,1	1,8

Полученные результаты свидетельствуют о том, что основными в золе являются соединения калия, кальция, кремния, фосфора, магния, натрия и серы (табл. 6). В золе внешней оболочки преобладает калий, в золе сердцевин – кальций. Содержание кремния во внешней оболочке в 2,5 раза больше, чем в сердцевине.

Таблица 5. Содержание зольных компонентов в стеблях топинамбура после экстракции при разных значениях pH

Table 5. Content of ash components in jerusalem artichoke stems after extraction at different pH values

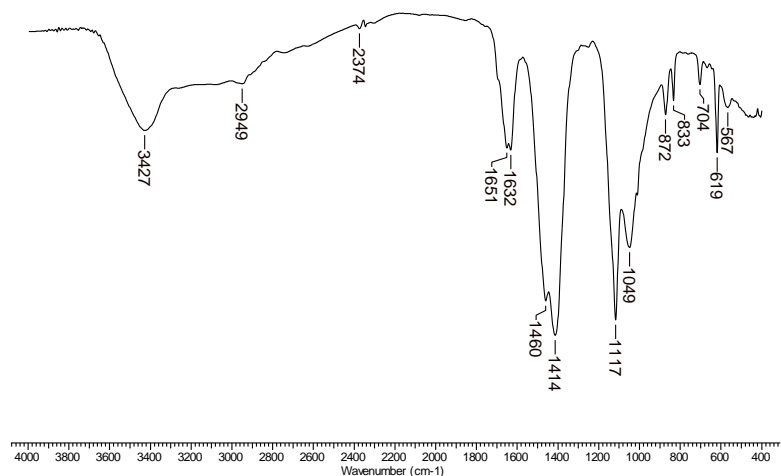
Экстрагент	Зольность, %	Цвет золы
H ₂ O	1,8	светло-серый
HCl, 0,1 н.	0,4	светло-бежевый
NaOH, 0,1 н.	2,3	светло-серый

Содержание калия в образцах золы снижается после предварительной обработки стеблей кислотой и щелочью, а кальция – только после обработки кислотой. Концентрация кремния увеличивается после кислотного гидролиза. Элементный состав образцов золы связан с разной растворимостью их соединений при различных значениях pH.

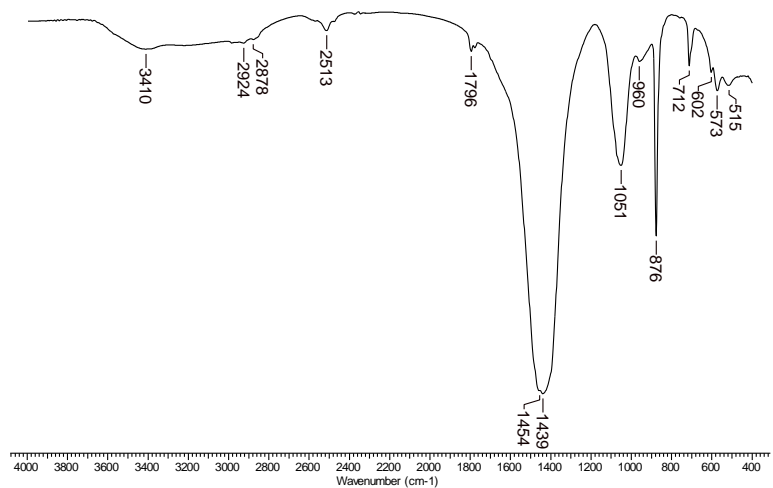
Состав основных химических элементов в золе исходного образца согласуется с данными [11], по количеству элементы в ряду располагаются в следующем порядке:



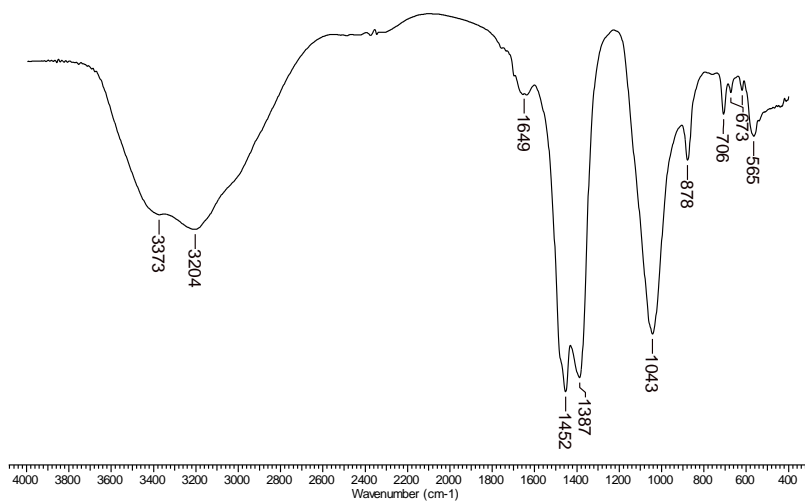
На рис. 2 представлены ИК-спектры поглощения образцов золы необработанных стеблей топинамбура: исходного, сердцевин и внешней оболочки, в которых наблюдаются полосы поглощения карбонатных групп (1460–1440 и 878–872 см⁻¹) [21] и силоксановых связей (интенсивные полосы валентных асимметричных колебаний в диапазоне 1117–1043 см⁻¹) [22]. Полосы поглощения в области 3400 и 1630–1640 см⁻¹ отвечают валентным и деформационным колебаниям адсорбированной воды и связанных ОН-групп. Согласно данным РФА, образцы золы находятся в аморфно-кристаллическом состоянии, сердцевин – в кристаллическом. (табл. 7). Основными соединениями, входящими в состав золы исходного образца и внешней оболочки, являются силикаты, а в состав сердцевин – силикаты и карбонаты, что согласуется с данными ИК-спектроскопии.



a



б



с

Рис. 2. ИК-спектры золы из стеблей топинамбура:
 а – исходный образец; б – сердцевина; с – внешняя часть
Fig. 2. FTIR spectrum of ash from jerusalem artichoke stems:
 a – initial sample; b – core; c – outer part

Таблица 7. Соединения, входящие в состав стеблей топинамбура, по данным РФА

Table 7. Compounds included in the stems of jerusalem artichoke according to the X-ray phase analysis data

Образец золы стеблей	Обработка	Состояние	Идентифицированные соединения
Исходный	нет	аморфно-кристаллическое	KCl, Ca ₂ SiO ₄
Сердцевина	нет	кристаллическое	CaCO ₃ , Ca ₂ SiO ₄ , KCl
Внешняя оболочка	нет	аморфно-кристаллическое	KCl, Ca ₂ SiO ₃ (OH) ₂ , Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ CO ₃ , CaMg(CO ₃) ₂
После водного гидролиза	вода	аморфно-кристаллическое	Ca ₃ Si ₃ O ₈ (OH) ₂ , Ca ₂ SiO ₄ /2CaO·SiO ₂
После кислотного гидролиза (0,1 М HCl)	HCl, 0,1 М	аморфно-кристаллическое	CaSiO ₃ , KCl, K ₄ CaSi ₃ O ₉
После щелочного гидролиза (0,1 М NaOH)	NaOH, 0,1 М	кристаллическое	CaCO ₃ , KCl, K ₄ CaSi ₃ O ₉

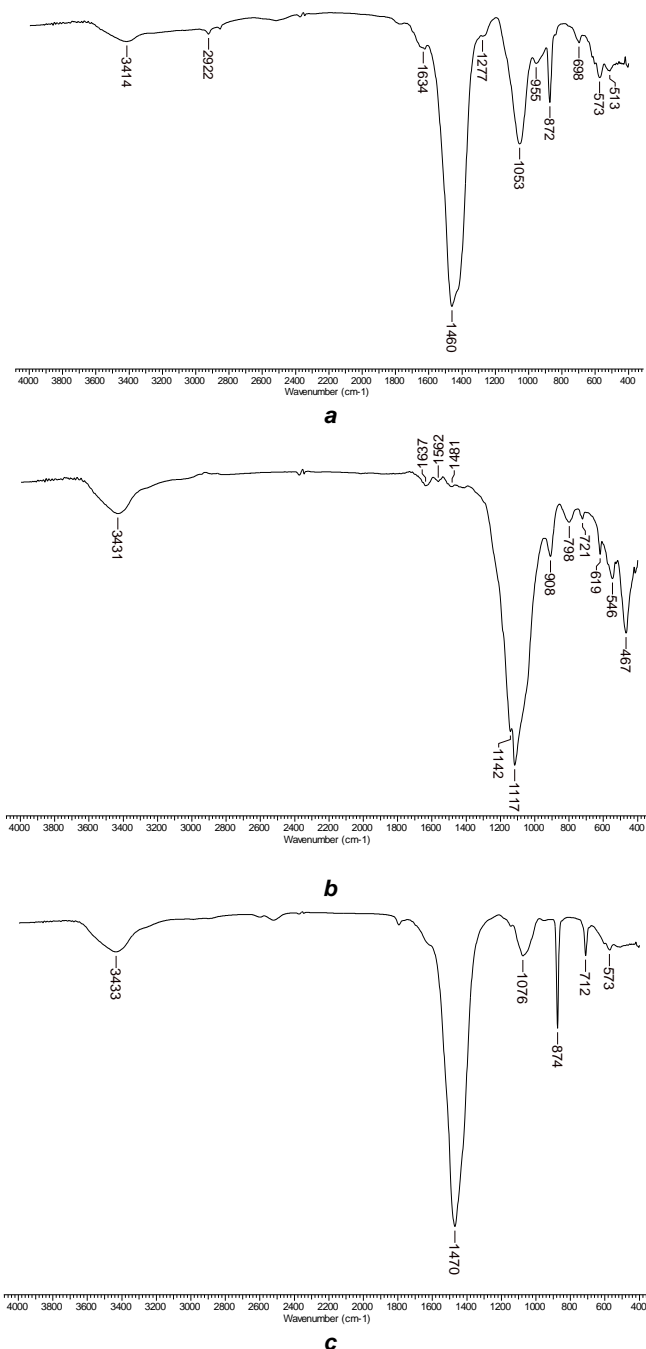


Рис. 3. ИК-спектры золы из стеблей топинамбура после обработки при разных значениях pH:
 а – водный гидролиз; б – кислотный гидролиз; с – щелочной гидролиз

Fig. 3. FTIR spectrum of ash from jerusalem artichoke stems after treatment at different pH values:
 a – water hydrolysis; b – acid hydrolysis; c – alkaline hydrolysis

Образцы золы, полученные после обработки ТС экстрагентами, находятся в аморфно-кристаллическом и кристаллическом состоянии (см. табл. 7). Идентификация линий показала, что основными соединениями, входящими в состав кристаллической фазы образцов золы, полученных после обработки стеблей топинамбура водой и кислотой, являются силикаты, а после обработки щелочью – карбонаты, что коррелирует с данными ИК-спектроскопии (рис. 3).

Полосы поглощения в области $1470\text{--}1460\text{ см}^{-1}$ и $874\text{--}872\text{ см}^{-1}$ отвечают карбонатным группам [21]. В ИК-спектре образца золы после водной экстракции видна также полоса поглощения связей силикатов Si–O–Me (1053 см^{-1}). В спектре образца после кислотной обработки стеблей (рис. 3, б) наблюдаются полосы поглощения деформационных (467 см^{-1}) и валентных (симметричных и асимметричных) колебаний (798 см^{-1} и 1117 см^{-1}) силоксановых связей Si–O–Si, а полоса при 908 см^{-1} указывает на связь Si–OH в соответствии с [22]. Вид этого спектра позволяет предположить, что аморфная фаза данного образца состоит в основном из диоксида кремния, что подтверждается и химическим анализом (см. табл. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследован состав неорганических компонентов стеблей топинамбура. Показано, что выход экстрактивных веществ из стеблей топинамбура зависит от природы экстрагента. Наибольший выход экстрактивных веществ наблюдается при обработке сырья 0,1 М гидроксидом натрия (45%), а минимальный – водой (31%). Основными экстрагируемыми ионами являются K^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} . По характеру термического разложения исходный образец и внешняя оболочка стебля близки между собой в отличие от сердцевин. Показано, что содержание минеральных веществ в сердцевине больше, чем во внешней части, где они представлены, в основном, соединениями калия, кальция, кремния и фосфора. В результате анализа ИК-спектров установлено, что в состав золы входят карбонаты и соединения кремния. Экстракция стеблей топинамбура при разных значениях pH показала, что интерес может представлять зола после кислотной обработки стеблей как источник аморфного диоксида кремния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перковец М.В. Инулин и олигофруктоза – больше, чем просто пищевые волокна и пребиотики // Молочная промышленность. 2007. N 9. С. 55–56.
2. Рязанова Т.В., Чупрова Н.А., Дорофеева Л.А., Богданов А.В., Шалина Ж.В. Химический состав вегетативной части топинамбура и ее использование // Лесной журнал. 1997. N 4. С. 71–75.
3. Аникиенко Т.И. Химический и микроэлементный состав клубней и зеленой массы топинамбура // Вестник КрасГАУ. 2008. N 2. С. 76–80.
4. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Мамохина А.А., Звягинцев П.С. Результаты и проблемы промышленного освоения производства и переработки топинамбура // Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. 2016. N 17. С. 48–52.
5. Papi N., Kafizadeh F., Fazaeli H. Use of Jerusalem artichoke aerial parts as forage in fat-tailed sheep diet // Small Ruminant Research. 2019. Vol. 174. Issue 53. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.03.001>
6. Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Багровская Н.А., Родионова М.В. Сорбционная очистка вин // Химия растительного сырья. 2007. N 1. С. 69–73.
7. Soldatkina L.M., Zavrishko M.A. Application of agriculture waste as biosorbents for dye removal from aqueous solutions // Chemistry, Physics and Technology of Surface. 2013. Vol. 4. Issue 1. P. 99–104. <https://doi.org/10.15407/hftp04.01.099>
8. Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Натарева С.В., Соловьева Е.А., Ефимов Н.А. Сорбция ионов меди(II) из водных растворов целлюлозо-содержащим сорбентом // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. N 7. С. 22–27.
9. Исмоилова М.А., Камиллов Х.Ч. Исследование сорбционных свойств стеблей топинамбура // Вестник Технологического университета Таджикистана. 2017. N 3 (30). С. 21–23.
10. Солдаткина Л.М. Получение и свойства биосорбентов на основе стеблей топинамбура // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы V Всероссийской конференции с международным участием (Барнаул, 24–26 апреля 2012 г.). Барнаул: Изд-во Алтайского государственного ун-та, 2012. С. 457–458.
11. Чупарина Е.В., Гуничева Т.Н., Белоголова Г.А., Матяшенко Г.В. Применение рентгенофлуоресцентного анализа для изучения распределения химических элементов в разных частях растений (на примере топинамбура) // Аналитика и контроль. 2005. Т. 9. N 4. С. 405–409.
12. Емелина Т.Н., Рязанова Т.В., Чупрова Н.А. Получение углеводсодержащих субстратов из вегетативной части топинамбура // Химия растительного сырья. 2002. N 2. С. 117–119.
13. Дорофеева Л.А., Рязанова Т.В., Чупрова Н.А. Исследование вегетативной части топинамбура. 2. Оптимизация процесса выделения целлюлозы // Химия растительного сырья. 1998. N 2. С. 59–62.
14. Xue C., Zhang X., Wang J., Xiao M., Chen L., Bai F. The advanced strategy for enhancing bio-butanol production and high-efficient product recovery with reduced wastewater generation // Biotechnology for Biofuels. 2017. Vol. 10. Article number 148. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0836-7>

15. Song Y., Wi S.G., Kim H.M., Bae H.-J. Cellulosic bioethanol production from Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) using hydroxide-acetic acid (HPAC) pretreatment // *Biore-source Technology*. 2016. Vol. 214. P. 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.065>

16. Dziekonska-Kubczak U., Berlowska J., Dziugan P., Patelski P., Pielech-Przybylska K., Balcerek M. Nitric acid pretreatment of Jerusalem artichoke stalks for enzymatic saccharification and bioethanol production // *Energies*. 2018. Vol. 11. Issue 8. P. 2153. <https://doi.org/10.3390/en11082153>

17. Khatun M.M., Li Y.-H., Liu C.-G., Zhao X.-Q., Bai F.-W., Mahfuza M., et al. Fed-batch saccharification and ethanol fermentation of Jerusalem artichoke stalks by an inulinase producing *Saccharomyces cerevisiae* MK01 // *RSC Advances*. 2015. Vol. 5. P. 107112–107118. <https://doi.org/10.1039/C5RA23901J>

18. Cabral M.R., Nakanishi E.Y., Marmol G., Palacios J., Godbout S., Lagace R., et al. Potential of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) stalks to

produce cement-bonded particleboards // *Industrial Crops and Products*. 2018. Vol. 122. P. 214–222. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.054>

19. Пат. № 2628608, Российская Федерация. Способ производства топливных брикетов или гранул / Я.П. Лобачевский, В.В. Михеев, Е.И. Резник, В.И. Еремченко, В.Ю. Малыхин, З.И. Рухая; патентообладатель ВНИИ механизации сельского хозяйства; заявл. 01.07.2016; опубл. 21.08.2017/.

20. Абдуллаев С.Ф., Сафаралиев Н.М., Партоев К. Исследование биологического поглощения тяжелых металлов растением-фиторемендиантом – топинамбуром // *Химическая безопасность*. 2019. Т. 3. N 1. С. 110–117. <https://doi.org/10.25514/CHS.2019.1.15009>

21. Беллами Л.Д. Инфракрасные спектры сложных молекул / пер. с англ. В.М. Акимова; под ред. Ю.А. Пентина. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 590 с.

22. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. 175 с.

REFERENCES

1. Perkovets MV. Inulin and oligofructose mean more than simply edible fibres and prebiotics. *Молодечная промышленность*. 2007;9:55–56. (In Russian)

2. Ryazanova TV, Chuprova NA, Dorofeeva LA, Bogdanov AV, Shalina ZhV. Chemical composition of the vegetative part of Jerusalem artichoke and its use. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 1997;4:71–75. (In Russian)

3. Anikienko TI. Chemical and microelement composition of tubers and green mass of Jerusalem artichoke. *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of KrasGAU*. 2008;2:76–80. (In Russian)

4. Starovoitov VI, Starovoitova OA, Manohina AA, Zvyagintsev PS. About results and problems of developing industrial production and processing of Jerusalem artichoke. *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.F. Katanova*. 2016;17: 48–52. (In Russian)

5. Papi N, Kafilzadeh F, Fazaeli H. Use of Jerusalem artichoke aerial parts as forage in fat-tailed sheep diet. *Small Ruminant Research*. 2019;174 (53):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.03.001>

6. Nikiforova TE, Kozlov VA, Bagrovskaya NA, Rodionova MV. Sorption cleaning of wines. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw material*. 2007;1:69–73. (In Russian)

7. Soldatkina LM, Zavrichko MA. Application of agriculture waste as biosorbents for dye removal from aqueous solutions. *Chemistry, Physics and Technology of Surface*. 2013;4(1):99–104. <https://doi.org/10.15407/htp04.01.099>

8. Nikiforova TE, Kozlov VA, Natareev SV, Solov'eva EA, Efimov NA. Sorption of copper(II) ions from aqueous solutions with a cellulose-containing sorbent. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya khimiya i khimicheskaya*

tekhnologiya = ChemChemTech. 2012;55(7):22–27. (In Russian)

9. Ismoilova MA, Kamilov KhCh. Investigation of sorption properties of topinambura steps. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta Tadjikistana*. 2017;3:21–23. (In Tajik)

10. Soldatkina LM. Preparation and properties of biosorbents based on Jerusalem artichoke stems. In: *Novye dostizheniya v khimii i khimicheskoi tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: materialy V Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* = Proceedings of the 5-th All-Russian Conference with International Participation “New Achievements in Chemistry and Chemical Technology of Plant Raw Materials”. 24–26 April 2012, Barnaul. Barnaul: Izdatel'stvo Altaiskogo universiteta: 2012, p. 457–458. (In Russian)

11. Chuparina EV, Gunicheva TN, Belogolova GA, Matyashenko GV. Application of X-ray fluorescence analysis for studying chemical element distributions in different plant parts, exemplified by artichoke. *Analitika i kontrol = Analytics and Control*. 2005;994):405–409. (In Russian)

12. Emelina TN, Ryazanova TV, Chuprova NA. Preparation of carbon-containing substrates from the vegetative part of Jerusalem artichoke. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw material*. 2002;2:117–119. (In Russian)

13. Dorofeeva LA, Ryazanova TV, Chuprova NA. Study of the vegetative part of Jerusalem artichoke. 2. Optimization of the cellulose extraction process. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw material*. 1998;2:59–62. (In Russian)

14. Xue C, Zhang X, Wang J, Xiao M, Chen L, Bai F. The advanced strategy for enhancing biobutanol production and high-efficient product recovery with reduced wastewater generation. *Biotechnology for Biofuels*. 2017;10. Article number 148. <https://doi.org/10.1039/C6BT00148A>

doi.org/10.1186/s13068-017-0836-7

15. Song Y, Wi SG, Kim HM, Bae H-J. Cellulosic bioethanol production from Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) using hydrothen porexide-acetic acid (HPAC) pretreatment. *Bioresource Technology*. 2016;214:30–36. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.065>

16. Dziekonska-Kubczak U, Berlowska J, Dziugan P, Patelski P, Pielech-Przybylska K, Balcerek M. Nitric acid pretreatment of jerusalem artichoke stalks for enzymatic saccharification and bioethanol production. *Energies*. 2018;11(8):2153. <https://doi.org/10.3390/en11082153>

17. Khatun MM, Li Y-H, Liu C-G, Zhao X-Q, Bai F-W, Mahfuza M, et al. Fed-batch saccharification and ethanol fermentation of Jerusalem artichoke stalks by an inulinase producing *Saccharomyces cerevisiae* MK01. *RSC Advances*. 2015;5:107112–107118. <https://doi.org/10.1039/C5RA23901J>

18. Cabral MR, Nakanishi EY, Marmol G, Palacios J, Godbout S, Lagace R, et al. Potential of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) stalks

to produce cement-bonded particleboards. *Industrial Crops and Products*. 2018;122:214–222. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.054>

19. Lobachevskij YP., Mikheev VV., Reznik EI., Eremchenko VI., Malykhin VYu., Rukhaya ZI. Fuel briquettes or granules roduction method. Patent RF, no. 2628608, 2016. (In Russian)

20. Abdullaev SF, Safaraliev NM, Partoev K. Study of biological absorption of heavy metals by phytoremediation plant jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *Khimicheskaya bezopasnost' = Chemical Safety Science*. 2019;3(1):110–117. (In Russian) <https://doi.org/10.25514/CHS.2019.1.15009>

21. Bellamy LJ. *The Infra-red spectra of complex molecules*. London: Methuen; New York: Wiley; 1958. 425 p. (Russ. ed.: Bellami LJ. *Infrakrasnye spektry slozhnykh molekul*. Under the Editorship of Yu.A. Pentin. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1963. 590 p).

22. Plyusnina II. *Infrared spectra of minerals*. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta; 1976. 175 p.(In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковехова Анна Васильевна,

к.х.н., доцент,
Дальневосточный федеральный университет,
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8,
Российская Федерация;
научный сотрудник,
Институт химии ДВО РАН,
690022, г. Владивосток,
пр-т 100-летия Владивостока, 159,
Российская Федерация,
✉ e-mail: kovekhova.av@dvfu.ru

Арефьева Ольга Дмитриевна,

к.пед.н., доцент,
Дальневосточный федеральный университет,
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8,
Российская Федерация;
научный сотрудник,
Институт химии ДВО РАН,
690022, г. Владивосток,
пр-т 100-летия Владивостока, 159,
Российская Федерация,
e-mail: arefeva.od@dvfu.ru

Диденко Нина Алексеевна,

научный сотрудник лаборатории химической радиоспектроскопии,
Институт химии ДВО РАН,
690022, г. Владивосток,
пр-т 100-летия Владивостока, 159,
Российская Федерация

Земнухова Людмила Алексеевна,

д.х.н., профессор, главный научный сотрудник
лаборатории химии редких металлов,
Институт химии ДВО РАН,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna V. Kovekhova,

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Far Eastern Federal University,
8, Sukhanov St., Vladivostok, 690950,
Russian Federation;
Researcher,
Institute of Chemistry FEB RAS,
159, Stoletiya Vladivostoka Ave.,
Vladivostok, 690022,
Russian Federation,
✉ e-mail: kovekhova.av@dvfu.ru

Olga D. Arefieva

Cand. Sci. (Pedagogy), Associate Professor
Far Eastern Federal University,
8, Sukhanov St., 690950, Vladivostok,
Russian Federation;
Researcher,
Institute of Chemistry FEB RAS,
159, Stoletiya Vladivostoka Ave.,
Vladivostok, 690022,
Russian Federation,
e-mail: arefeva.od@dvfu.ru

Nina A. Didenko,

Researcher,
Laboratory of Chemical Radio Spectroscopy,
Institute of Chemistry FEB RAS,
159, Stoletiya Vladivostoka Ave.,
Vladivostok, 690022,
Russian Federation

Liudmila A. Zemnukhova,

Dr. Sci. (Chemistry), Professor,
Chief Researcher,
Laboratory of Chemistry of Rare Metals,

690022, г. Владивосток,
пр-т 100-летия Владивостока, 159,
Российская Федерация,
e-mail: zemnukhova@ich.dvo.ru

Institute of Chemistry FEB RAS,
159, Stoletiya Vladivostoka Ave.,
Vladivostok, 690022,
Russian Federation,
e-mail: zemnukhova@ich.dvo.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта ин-
тересов.

*Все авторы прочитали и одобрили оконча-
тельный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 09.04.2021.
Одобрена после рецензирования 17.05.2021.
Принята к публикации 31.05.2021.*

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests re-
garding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

*The article was submitted 09.04.2021.
Approved after reviewing 17.05.2021.
Accepted for publication 31.05.2021.*