Проблемы классификации химических элементов в биомедицинских исследованиях

М. В. Кравчик[1], И. А. Новиков[1]

УДК 577.11

Продолжается внедрение новых методов химического анализа в фундаментальные медико-биологические исследования. Возникают дополнительные данные о содержании малых элементов в тканях, роль которых в химических реакциях организма может рассматриваться по аналогии с поведением уже изученных. Существующее многообразие классификаций химических элементов не в полной степени отражает их группировку по сходной роли в метаболизме, основанной на химическом родстве. В статье рассмотрены актуальные классификации химических элементов биологических систем и предложена новая систематизация, адаптированная для решения задач фундаментальной медицины.

Ключевые слова: химические элементы, биология, медицина, метаболизм, микроэлементы, биоэлементы

Статья получена 23.04.2021
Принята к публикации 12.05.2021

Долевая классификация химических элементов

Развитие знаний о функции и роли химических элементов в биологических системах всегда было тесно связано с прогрессом в области методологических подходов к анализу биологических объектов.

Одна из первых систематизаций химических элементов в биологии была проведена с позиции геохимии В. И. Вернадским [1]. В его трудах отмечается существование двух принципиально различных форм нахождения химических элементов в организмах: «с одной стороны, они встречаются в форме соединений, строящих организм, а с другой – в форме проникающих в организм ничтожных своих следов».

На основе этого постулата в дальнейшем закрепилось разделение химических элементов биологических систем на основные и следовые элементы (trace elements).

[1] ФГБНУ «НИИ глазных болезней», ул. Россолимо, 11, А,Б, Москва, 119021, Российская Федерация.
kravchik.mv@gmail.com.

В российской медицинской школе термин «следовые элементы» не вошел в употребление, вместо этого широко используются термины «микроэлементы» и «ультрамикроэлементы». В соответствии с расчетом веса химического элемента по отношению к массе тела организма широко применяется следующая классификация химических элементов человеческого организма [2]:

- макроэлементы (концентрация от 0,01% к массе тела и выше) – O, C, H, N, Ca, P, K, Na, S, Cl, Mg;
- микроэлементы (концентрация от 0,00001% к массе тела и выше) – Fe, Zn, F, Sr, Mo, Cu, Br, Si, Cs, J, Mn. Al, Pb, Cd, B;
- ультрамикроэлементы (концентрация от 0,000001% к массе тела и ниже Se, Ni, V, Cr, As, Ni, Li, Ba, Ti, Sn, Be, Ga, Ge, Hg, Sc, Zr, Bi, Sb, U, Th, Rh.

При этом граница между терминами, определяемая долей химического элемента по отношению к массе тела человека, различается у разных авторов [3, 4], а понятия «ультрамикроэлемент» и «микроэлемент» иногда не отделяют друг от друга [3].

В зарубежных публикациях в области медицины принадлежность химического элемента

к конкретной группе, как правило, определяется на основании потребности человека в приеме соответствующих элементов с пищей. Так, к макроэлементам относятся те химические элементы, которые необходимы в относительно высоких количествах (более 100 мг в день), например Ca, P, Na [5]. Следовым считается химический элемент-нутриент, который для поддержания здоровья должен находиться в пище в относительно малых количествах [6].

Существуют и другие определения для отдельных групп химических элементов в клинической медицине и биологии, которые возникли в зависимости от акцента на конкретную рассматриваемую задачу. Например, токсичные элементы – это химические вещества, которые могут присутствовать в пище в количествах, потенциально опасных для здоровья человека [7]. Органогенными называют химические элементы, входящие в состав всех органических соединений и составляющие около 98% массы клетки [8]. К эссенциальным относят химические элементы, без которых невозможны нормальный рост и воспроизводство биологического организма. При расшифровке этого определения в биологическом словаре отмечается то, что набор эссенциальных химических элементов различен для животных и для растений [9]. Размытый характер таких классификаций связан с нечеткой границей концентраций, при которых химический элемент в одних условиях для одного организма может быть эссенциальным, в других условиях для другого организма – проявлять токсические свойства, а в третьей системе – быть органогенным.

Первые попытки классификации химических элементов на основе закономерностей их накопления в биологических системах

Новые высокотехнологичные методы, такие как нейтронная активация, рентгеновская флуоресценция и атомно-эмиссионная спектроскопия расширили возможности для изучения свойств и оценки состояния биологических образцов. Использование инструментальных многоэлементных методов исследований позволило дополнить знания о вовлечении химических элементов в процессы, происходящие в биологических объектах. В работах, рассматривающих подходы к анализу биологических образцов (преимущественно – представителей растительного царства) высокотехнологичными методами химического анализа, затрагивается вопрос о разделении химических элементов в соответствии с главенствующим участием их в определенных биологических процессах на три подвида: структурные элементы, электролиты и элементы, участвующие в ферментативных реакциях [10–12].

При изучении взаимосвязи химических элементов полевых растений С. Гартен (1976) обнаружил межэлементные корреляции для элементов P, N, K, Ca и Mg вне зависимости от мест произрастания изученных видов. Высокие коэффициенты корреляции для N и P объясняются хорошей ассоциацией двух элементов, особенно во время биосинтеза белка, в то время как для Ca и Mg они были истолкованы на основе общих активаторов ферментов во время различных метаболических процессов [13].

Представленная межэлементная корреляция была расширена данными из стандартных справочных материалов и результатами высокоточных научных исследований. При использовании линейного регрессионного анализа полученных данных по аналогии с периодической системой элементов была создана Биологическая система элементов (BSE). Расположение химического элемента в этой таблице зависит от степени корреляционной связи с соседними химическими элементами [14].

Предложенная система распределения определенных химических свойств несколько ограничена выборкой организмов, для которых были исследованы корреляции. Она может быть использована для моделирования поведения определенных химических элементов в процессах, определяющих жизнедеятельность растений, однако остается вопрос: может ли она быть столь же эффективной в применении ко всему разнообразию животного мира в общем и организма человека в частности?

Биоэлемент, как структурная единица живого вещества

С позиции изучения человеческого организма широко распространен термин «биоэлемент», который обозначает те структурные единицы, которые необходимы для функционирования живого. Научно-практическое направление, изучающее состав, содержание, связи и взаимодействие биоэлементов в организме человека, а также взаимодействие биоэлементов с другими химическими элементами и биоактивными веществами, называется биоэлементологией [15].

Изначально в биоэлементологии термин «биоэлемент» был тождественен термину «химический элемент» и относился к конкретному химическому

элементу, который играет определенную биологическую роль или присутствует в живом организме. Но в 2009 году [16] была выдвинута классификация биоэлементов на основе вышеупомянутого разделения на структурные, электролиты и элементы, участвующие в ферментативных реакциях (энзиматические), а также исходя из представления о возможности существования единицы биоэлемента в виде отдельной молекулярной структуры [17]. Следуя этой логике, предложено классифицировать первичные биоэлементы следующим образом [16]:

- простые:
  - структурные (C, H, N, O, P, S, Si, Ca),
  - электролитические (K, Na, Ca, Cl, Mg),
  - энзиматические (Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, Co, Cr, Mo, Se, Sn, F, I, Ni, V, B),
  - простые молекулы (H_2O, O_2, N_2);
- сложные (68 органических молекул):
  - 8 нуклеиновых кислот (дезоксиаденозин, дезоксицитидин, дезоксигуанозин, дезокситимидин, аденозин, цитидин, гуанозин, уридин);
  - 20 аминокислот, необходимых для синтеза белка (аланин, аргинин, аспарагиновая кислота, аспарагин, цистеин, глутаминовая кислота, глутамин, глицин, гистидин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, фенилаланин, пролин, серин, треонин, триптофан, тирозин, валин);
  - 32 гликана (фукоза, галактоза, глюкоза, глюкуроновая кислота, манноза, N-ацетилгалактозамин, N-ацетилглюкозамин, нейраминовая кислота, ксилоза, нонановая кислота, октулозоновая кислота, арабиноза, арабинофураноза, колитоза, фруктоза, галактофураноза, галактуроновая кислота, глюколактиловая кислота, гептоза, легионаминовая кислота, маннуроновая кислота, N-ацетилфукозамин, N-ацетилгалактуроновая кислота, N-ацетилманнозамин, N-ацетилманнозаминоуроновая кислота, N-ацетилмурамовая кислота, N-ацетилперозамин, N-ацетилквиновозамин, перозамин, псевдаминовая кислота, рамноза, талоза);
  - 8 типов липидов (жирные ацилы, глицеролипиды, глицерофосфолипиды, поликетиды, преноловые липиды, сахаролипиды, сфинголипиды, стироловые липиды).

Предложенная система содержит новый подход к теоретическому пониманию того, что является элементом и биоэлементом в организме человека. Однако такую классификацию довольно сложно использовать в решении практических задач, так как она объединяет вещества, требующие применения принципиально различающихся методов аналитической химии для их идентификации и дальнейшего изучения. Кроме этого, химические элементы, соседствующие в одной подгруппе, могут выполнять противоположные задачи в обменных процессах человеческого организма.

Классификация химических элементов на основе их поведения в физико-химических системах организма человека

Понятие «биоэлемент» перекликается с понятием «биофильный элемент», который был введен В. М. Гольдшмидтом и обозначает химические элементы, поглощаемые из геохимической среды организмами и используемые ими в процессах жизнедеятельности.

Геохимическая классификация В. М. Гольдшмидта основана на преимущественном распределении химических элементов по оболочкам Земли и учитывает электронное строение атомов, положение элемента на кривой атомных объемов, магнитные свойства элементов и химическое сродство прежде всего к O и S, затем к As и др. В классификации все элементы разделены на:

- атмофильные: (H, N и шесть благородных газов);
- литофильные: (50, среди которых Be, O, C, B, Na, Mg, Al, Si, Cl, K);
- халькофильные (20, среди которых S, Cu, Zn, As, Se, Ag, Cd, Sb, Te, Au, Hg);
- сидерофильные (11, среди которых Fe, Co, Ni, Mo, Ru, Rh, Os);
- биофильные (C, H, O, N, P, S, Cl, I).

При этом к биофильным относится часть элементов других групп, что свидетельствует о том, что в различных условиях одни и те же химические элементы могут рассматриваться как элемент живой, так и неживой природы [18].

Иной принцип геохимической классификации был предложен С. Т. Бадаловым [19]. В отличие от предыдущих, в ней группируются не сами элементы по их свойствам, а физико-химические системы, в которых элемент проявляет то или иное свойство.

На основании схожего принципа в фундаментальных биологических работах зачастую принято классифицировать не столько сами элементы, сколько группы процессов, в которых определенные

химические элементы принимают участие. Наиболее удачной в этом отношении является классификация физико-химических обменных реакций в биологии, предложенная И. Бертини [20]. В ней химические элементы группируются по участию в следующих процессах:

- обеспечение электронейтральности и электролитической электропроводности: Na, K, Cl;
- структурная организация и матричный синтез: Ca, Zn, Si, S;
- передача сигнала: Ca, B, NO;
- буферное действие брёнстедовских кислот и оснований: P, Si, C;
- катализ льюисовыми кислотами и основаниями: Zn, Fe, Ni, Mn;
- транспорт электронов: Fe, Co, Mo;
- перенос групп, таких как CH_3, S, O, V, Fe, Co, Ni, Cu, W, Mo;
- окислительно-восстановительный катализ: V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, W, S, Se;
- накопление энергии: H, P, S, Na, K, Fe;
- биоминерализация: Ca, P, Mg, Fe, Cu, Si, Sr.

Несмотря на довольно исчерпывающий характер классификации, присутствие одного и того же химического элемента в разных подгруппах затрудняет ее применение в биомедицинских исследованиях. При получении аналитических данных о дисбалансе в концентрации конкретного химического элемента, невозможно однозначно сфокусироваться на локальном участии этого химического элемента в обмене. Такая группировка не совсем подходит для определения главенствующего вектора нарушений, выявляемых при патологических процессах. Поэтому после ее появления оставался актуальным вопрос объединения химических элементов по сходной роли в метаболизме человека, основанной на химическом родстве.

Благодаря внедрению новых методов химического анализа в фундаментальные медико-биологические исследования стали известны детали распределения химических элементов на тканевом, клеточном или молекулярном уровне, а также нюансы их взаимодействия, выработанные в результате эволюции для выполнения разнообразных функций. Особенно стоит отметить методику криомикроскопии, расширяющую возможности структурной биологии. С помощью криомикроскопии биологические образцы могут быть исследованы в их нативном состоянии, в буфере или клеточном окружении. В сочетании с химическим микроанализом появляется возможность изучать химический состав вещества, минимально измененный пробоподготовкой. Объяснено большое число взаимосвязей между структурой и функцией, выявлены лежащие в их основе закономерности электронного строения. Возникают дополнительные данные о содержании малых элементов в тканях, роль которых в химических реакциях организма может рассматриваться по аналогии с поведением уже изученных. Это требует группировки элементов, в том числе и по их химическим свойствам.

Действительно, щелочные катионы электролитов и их аналоги определяют гидростатику и гидродинамику жидких сред организма человека, как за счет работы насосов, так и за счет регуляции осмоса. Щелочноземельные элементы и их аналоги участвуют в процессах биоминерализации и межклеточного взаимодействия в тканях. Халькофильные металлы и их аналоги регулируют окислительно-восстановительные реакции, так как являются типичными кофакторами металлопротеиназ, поддерживающих структурный гомеостаз тканей. Так цинк является кофактором карбоангидразы, супероксиддисмутазы, NO-синтазы, НАДФН-оксидазы; медь является кофактором церулоплазмина; кобальт – метилтрансферазы, витамина B12; молибден – сульфитоксидазы, ксантиноксидазы, альдегидоксидазы. Сидерофильные металлы регулируют окислительно-восстановительные реакции, в том числе связанные с ограничением снабжения тканей при патологических процессах. Структурообразующие неметаллы и их аналоги непосредственно участвуют в формировании белковых молекул. Присутствие фосфора определяет энергозависимые процессы. Отмечается возможное участие амфотерных инертных металлов и неметаллов в процессах минерализации.

Взаимосвязь между строением химических элементов и их поведением в организме иллюстрируется взаимодействием биологической клетки с катионами-ингибиторами обмена щелочноземельных элементов – элементами группы лантана. В соответствии с принципом универсального химического изоморфизма [21] при взаимодействии с лантаноидами в биологической системе происходит гетеровалентное замещение ионов кальция $[Ca^{2+} + Ca^{2+}] \leftrightarrow [Ln^{3+} + Me^{+}]$ на тех участках метаболических цепочек, где предполагается одновременный транспорт двух ионов кальция, но в точке деления на две ветви с независимым транспортом Ca^{2+} система уже не способна обработать чужеродный катион, в результате чего ингибируется обмен щелочноземельных элементов [22].

Основываясь на существующих классификациях химических элементов, а также на данных об их участии в известных группах химических

превращений в условиях организма человека, мы предлагаем свою классификацию. Несмотря на некоторое упрощение по сравнению с классификацией И. Бертини, ее удобно использовать для решения биомедицинских задач в области реконструкции патогенетических цепочек. На основе поведения в физико-химических системах организма человека химические элементы с позиции потребностей фундаментальной медицины можно подразделить на следующие группы:

- щелочные катионы электролитов, их аналоги: K, Na, Li, Rb, Cs;
- щелочноземельные элементы – участники процессов биоминерализации и межклеточного взаимодействия, их аналоги: Ca, Mg, Sr, Ba, Be;
- халькофильные металлы – регуляторы окислительно-восстановительных реакций и типичные коактиваторы матриксных ферментов, их аналоги: Zn, Cu, Hg, Co, Ni, Cd, Pb, Mo, Sb;
- сидерофильные металлы – регуляторы ОВ-реакций, их аналоги: Fe, Mn, Cr, Rh;
- амфотерные инертные металлы и неметаллы: Al, Si, Ga, V, TI, Sn, Ge, Zr, W;
- структурообразующие неметаллы и их аналоги: N, S, Se, As;
- анионы электролитов: Cl, F, Br, J, B;
- анионы энергозависимых процессов: P;
- катионы-ингибиторы обмена щелочноземельных элементов: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Sc.

Вывод

Исследователь выбирает ту или иную систему классификации химических элементов с учетом решаемых задач. При описании количественных особенностей распределения химических элементов в биологической системе целесообразно применение долевых классификаций химических элементов. Для иллюстрации свойств элементов, потенциально опасных для человека даже в крайне малых концентрациях, разумно использовать клиническую медицинскую терминологию. При моделировании поведения определенных химических элементов в процессах, определяющих жизнедеятельность растений, удобно пользоваться системой BSE. Для теоретизации знаний о биоэлементах в организме человека в рамках интегративных междисциплинарных задач, рационально использовать классификацию, предложенную исследователями в области биоэлементологии.

С позиции фундаментальной медицины существующее многообразие классификаций химических элементов не в полной степени отражает их доминантную роль в реакциях организма человека, которая в том числе диктуется физико-химическими свойствами. Для решения биомедицинских задач химические элементы целесообразно группировать в соответствии с предложенной классификацией, которая сформирована с учетом, как биологической роли элементов, так и схожести их физико-химических свойств.

Литература

1. **Вернадский В.И.** Живое вещество. М.: Наука, 1978. 358 с.
2. **Скальный А.В., Рудаков И.А., Нотова С.В.** Биоэлементная медицина-вопросы терминологии. *Вестник ОГУ*. 2003(7).
3. **Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С.** Микроэлементозы человека. М.: Медицина. 1991. 496 с.
4. **Полянская И.С.** Новая классификация биоэлементов в биоэлементологии. *Молочнохозяйственный вестник*. 2014;1(13):34–42.
5. **Farlex P.** Medical Dictionary. *Saunders comprehensive veterinary Dictionary*. 2012.
6. **Youngson R.** Collins dictionary of medicine: Collins; 2005.
7. **Pavón J., de Torres A., Rojas F., Ojeda C., Alonso E.** The toxic elements. *Handbook of Mineral Elements in Food*. 2015;123–152.
8. **Билич Г.Л., Крыжановский В.А.** Биология. Полный курс: В 4 т. / 5-е изд., доп. и перераб. М.: Издательство Оникс. 2009;1:864 с.
9. **Hale W., Margham J.** The Harper Collins dictionary of biology, 1991.
10. **Skalny A.V.** Bioelementology as an interdisciplinary integrative approach in life sciences: Terminology, classification, perspectives. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2011;25: S3-S10.
11. **Sansoni B., Iyengar V.** Sampling and sample preparation methods for the analysis of trace elements in biological material. Germany: Kernforschungsanlage Juelich GmbH, 1978.
12. **Ernst W.** Instrumental Element and Multi–Element Analysis of Plant samples. Methods and Applications. *Plant Ecology*. 1998;136(2):250–251.
13. **Garten C.** Correlations between concentrations of elements in plants. *Nature*. 1976;261(5562):686–688.
14. **Markert B.** The biological system of the elements (BSE) for terrestrial plants (glycophytes). *Science of the total environment*. 1994;155(3):221–228.
15. **Скальный А.В., Рудаков И.А., Нотова С.В., Скальный В.В., Бурцева Т.И., Баранова О.В.** Биоэлементология: основные понятия и термины: терминологический словарь. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. 50 с.
16. **Скальный А.В.** Развитие концепции биоэлементов и перспективы биоэлементологии. *Микроэлементы в медицине*. 2009:10(3–4):1–6.
17. **Marth J.** A unified vision of the building blocks of life. *Nature cell biology*. 2008;10(9):1015–1016.
18. **Goldschmidt V.** Geochemische verteilungsgesetze und kosmische häufigkeit der elemente. *Naturwissenschaften*. 1930;18(47–49):999–1013.
19. **Добровольская М.Г.** Геохимия земной коры. М.: Изд-во РУДН, 2007. 459 с.
20. **Bertini I., Gray H., Gray H., Valentine J., Stiefel E.** Biological inorganic chemistry: structure and reactivity. Sausalito, California: University Science Books, 2007.
21. **Урусов В.С.** Теоретическая кристаллохимия. М.: Изд-во МГУ, 1987. 275 с.

22. **Новиков И.А., Суббот А.М., Федоров А.А., Грибоедова И.Г., Антонов Е.Н., Вахрушев И.В.** Суправитальное контрастирование лантаноидами для визуализации структуры биологических образцов на сканирующем электронном микроскопе. *Гены и клетки*. 2015;10(2):90–96.

References

1. **Vernadsky V.I.** Living matter. Moscow, Nauka Publ., 1978. 358 p. (In Russ.).
2. **Skalnyi A.V., Rudakov I.A., Notova S.V.** Bioelement Medicine – Terminology Issues. *Vestnik OGU*. 2003(7). (In Russ.).
3. **Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strochkova L.S.** Human microelementoses. Moscow, Meditsina Publ., 1991. 496 p. (In Russ.).
4. **Polyanskaya I.S.** New classification of bioelements in bioelementology. *Molochnokhozyaistvennyi vestnik – Dairy Bulletin*. 2014;1(13):34–42. (In Russ.).
5. **Farlex P.** Medical Dictionary. *Saunders comprehensive veterinary Dictionary*. 2012.
6. **Youngson R.** Collins dictionary of medicine: Collins; 2005.
7. **Pavón J., de Torres A., Rojas F., Ojeda C., Alonso E.** The toxic elements. *Handbook of Mineral Elements in Food*. 2015;123–152.
8. **Bilich G.L., Kryzhanovskii V.A.** Biology. Complete course. Moscow, Onyx Publ., 2009. 864 p. (In Russ.).
9. **Hale W., Margham J.** The Harper Collins dictionary of biology, 1991.
10. **Skalny A.V.** Bioelementology as an interdisciplinary integrative approach in life sciences: Terminology, classification, perspectives. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2011;25: S3-S10.
11. **Sansoni B., Iyengar V.** Sampling and sample preparation methods for the analysis of trace elements in biological material. Germany: Kernforschungsanlage Juelich GmbH, 1978.
12. **Ernst W.** Instrumental Element and Multi-Element Analysis of Plant samples. Methods and Applications. *Plant Ecology*. 1998;136(2):250–251.
13. **Garten C.** Correlations between concentrations of elements in plants. *Nature*. 1976;261(5562):686–688.
14. **Markert B.** The biological system of the elements (BSE) for terrestrial plants (glycophytes). *Science of the total environment*. 1994;155(3):221–228.
15. **Skalnyi A.V., Rudakov I.A., Notova S.V., Skalnyi V.V., Burtseva T.I., Baranova O.V.** Bioelementology: basic concepts and terms: terminological dictionary Orenburg, GOU OGU Publ., 2005. 50 p. (In Russ.).
16. **Skalny A.V.** Development of the concept of bioelements and the prospects of bioelementology. *Mikroelementy v meditsine – Trace Elements in Medicine*. 2009;10(3–4):1–6. (In Russ.).
17. **Marth J.** A unified vision of the building blocks of life. *Nature cell biology*. 2008;10(9):1015–1016.
18. **Goldschmidt V.** Geochemical laws of distribution and cosmic abundance of the elements. *Naturwissenschaften*. 1930;18(47–49):999–1013. (In German).
19. **Dobrowolckaja M.G.** Geochemistry of the earths crust. Moscow, RUDN Publ., 2007. 459 p. (In Russ.).
20. **Bertini I.., Gray H., Gray H., Valentine J., Stiefel E.** Biological inorganic chemistry: structure and reactivity. Sausalito, California: University Science Books, 2007.
21. **Urusov V.S.** Theoretical crystal chemistry. Moscow, MSU Publ., 1987. 275 p. (In Russ.).
22. **Novikov I.A., Subbot A.M, Fedorov A.A., Griboedova I.G., Antonov E.N., Vakhrushev I.V.** Supravital lanthanoid staining for scanning electron microscopy of biological objects. *Geny i kletki – Genes&Cells*. 2015;10(2):90–96. (In Russ.).

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК | НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ | ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ РАН
ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ и ЭЛЕКТРОХИМИИ им. А.Н. ФРУМКИНА | МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ВСЕРОССИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ и ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»

г. Севастополь, 27 октября – 3 ноября 2021

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СИМПОЗИУМА

01 Физико-химические методы при междисциплинарных исследованиях

02 Синтез, строение, физико-химические свойства и применение новых сорбционных и хроматографических материалов для промышленного и аналитического применения

03 Фундаментальные и прикладные вопросы физико-химических процессов на границе раздела фаз

04 Применение физико-химических методов при оценке физических и химических факторов загрязнения окружающей среды и др.

Вся текущая информация о симпозиуме, включая регистрацию участников, программу, правила оформления тезисов и др. на официальном сайте симпозиума: www.methods.phyche.ac.ru

Место проведения: ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН»
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2, тел./факс: +7 (869) 2545241
www.mhi-ras.ru