

УДК 561:577.21
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5103
Шифр специальности ВАК: 1.6.10
Научная статья

Применение ИК-спектроскопии диффузного отражения в молекулярной палеонтологии

В.П. Иванов[✉], И.В. Рычкова, М.Г. Пахтаева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]ivp2005@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью выявления новых диагностических признаков в структурах родственных ископаемых и современных растений. Молекулярная палеонтология как самостоятельное направление хорошо себя зарекомендовало в части изучения ископаемых представителей растительного и животного мира. *Цель.* Изучение фитолейм и гербариев проводилось по ИК-спектрам диффузного отражения и по результатам их обработки ИТ-программой ASPECT, которая является частью методологии структурно-кластерного анализа углефицированных веществ. Такой подход позволяет получать результаты количества структурообразующих кластеров, состоящих из элементов С, N, H, O, и количественный состав функциональных групп С-С, С-N, С-Н, С-О, N-H, N-O в образце вещества. *Объекты.* Образцы современных и средне-позднеюрских мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид. *Методы.* Морфологический, эпидермально-кутикулярный, ИК-спектрометрический. *Результаты и выводы.* В молекулярной структуре мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид за счёт связей С-N и С-O происходит рекомбинация в связи С-N, N-H, N-O. Существуют структурные отличия листьев от стебля у хвоща и папоротника, но особенно хвощовые и папоротники отличаются большим количеством функциональных структурных единиц vCCN и vOCO в хвощах и большим количеством vCC и δNH в папоротниках, что служит диагностическим критерием в молекулярной палеоботанике. Сравнительный анализ угля и фитолеймы хвоща *Equisetites* sp. из скважин на площади Снежная в Томской области показал, что структура углефицированного вещества захороненных хвощей в нижележащих осадках по количеству связей С-С, С-N, С-О, N-H не отличается от структуры углей, концентрированных выше в виде тонкого прослоя. Это может свидетельствовать об образовании угля из хвощовых торфяных осадков, где признаком различия может служить количество СН-связи, которых в угле меньше.

Ключевые слова: молекулярная палеонтология, фитолейма, гербарий, ИК-спектрометрия, юрские растения

Благодарности: Исследование поддержано грантом РНФ (проект № 23-27-00013).

Для цитирования: Иванов В.П., Рычкова И.В., Пахтаева М.Г. Применение ИК-спектроскопии диффузного отражения в молекулярной палеонтологии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 238–246. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5103

UDC 561:577.21
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5103
Scientific paper

Diffuse reflectance IR spectroscopy in molecular paleontology

V.P. Ivanov[✉], I.V. Rychkova, M.G. Pakhtaeva

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]ivp2005@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to identify new diagnostic features in the structures of related fossils and modern plants. Molecular paleontology as an independent direction has proved itself well in the part of studying fossil representatives of plant and animal world. **Aim.** The study of phytolaims and herbariums by IR spectra of diffuse reflectance after their processing by the

ASPECT programme complex is a part of the structural cluster analysis of carbonized substances methodology. It allows obtaining the results of structure-group analysis in the form of calculation of the number of functional structural units – structure-forming clusters from elements C, N, H, O and their quantity in the form of elemental composition C-C, C-N, C-H, C-O, N-H, N-O. **Objects.** Samples of the recent and Middle-Late Jurassic mosses, horsetails, ferns and ginkgoopsids. **Methods.** Morphological, epidermal-cuticular, infrared spectrometric. **Results and conclusions.** In the molecular structure of mosses, horsetails, ferns and ginkgoopsids, due to the C-N and C-O bonds, recombination occurs in the C-H, N-H, N-O bonds. There are structural differences between the leaves and the stem of horsetails and ferns, but horsetails and ferns are especially distinguished by a large number of functional structural units vCCN and vOCO in horsetails and a large number of vCC and δ NH in ferns, which serve as a diagnostic criterion in molecular paleobotany. Comparative analysis of coal and phytolite of horsetail *Equisetites* sp. from wells in the Snezhnaya area in the Tomsk region showed that the structure of the carbonized matter of buried horsetails in the underlying sediments does not differ in the number of C-C, C-N, C-O, N-H bonds from the structure of coals concentrated above in the form of a thin layer. This may indicate the formation of coal from horsetail peat sediments, where the difference may be indicated by the number of CH bonds, which are smaller in coal.

Keywords: molecular paleontology, phytolite, herbarium, IR spectrometry, Jurassic plants

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-27-00013.

For citation: Ivanov V.P., Rychkova I.V., Pakhtaeva M.G. Diffuse reflectance IR spectroscopy in molecular paleontology. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 238–246. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5103

Введение

На современном этапе развития науки молекулярная палеонтология представляет собой самостоятельное направление, изучающее молекулярные следы жизнедеятельности организмов, по структуре которых можно было бы судить об их биохимическом происхождении и проследить эволюцию живого вещества [1]. Из ископаемых тканей только биомолекулы являются пока наиболее информативными при идентификации организма, т. к. в результате диагенеза на фоссилизацию влияет очень много факторов [2]. Молекулы, сохранённые в окаменелостях, могут быть использованы как доказательства эволюции организмов на молекулярном уровне. Молекулярные соединения в живом веществе – белки, жиры, углеводы, остаются практически неприкосновенными по своему строению. Такое наследование биохимической информации обусловлено сохранением углеродного скелета в биомолекулах [3].

Автор обзорной статьи [4] уточняет, что молекулярная палеонтология направлена на изучение древних сложных биомолекул окаменелостей, которые могут предоставить важную информацию для понимания эволюции организмов и процесса фоссилизации на молекулярном уровне и облегчить распознавание сохранившихся биомаркеров для идентификации жизни. Для этого в изучении, например, окаменелостей нептичьих динозавров [5] используются неразрушающие методы и процедуры, ограниченные поверхностью образца, в частности, световая и электронная микроскопия, инфракрасная (ИК) и рамановская спектроскопия. Кроме этого, используют более инвазивные подходы, включая жидкостную хроматографию в сочетании с тандемной масс-спектрометрией (ЖХ-МС/МС), времяпролетную вторичную ионную масс-спектрометрию и иммунологические методы [6].

Для определения редкоземельных элементов и проведения молекулярного анализа часто используются мягкие ткани [7], а в качестве биомаркеров – молекулы на основе порфирина, проливающие свет на эволюцию жизни [8]. Но, например, для изучения эукариот возрастом около 1 млрд лет используются молекулярные окаменелости в битумах и керогенах [9]. Поэтому в молекулярной палеонтологии важным обстоятельством является сохранность образца в процессе проведения анализа [10]. Эти авторы установили, что фрагменты белка чаще встречались в осадочных отложениях (33,3 %), а древние последовательности ДНК чаще встречались в осадочных средах. Поэтому изменение белка, в частности коллагена, можно наблюдать в процессе измерения методом ИК-Фурье отражения [11].

С другой стороны, в накоплении органического углерода решающую роль играет поступление растительной массы остатков от высших растений [12], что в целом приводит к образованию слоёв углей, также изучаемых с помощью этого метода.

Таким образом, данный метод является эффективным в изучении механизма накопления органического вещества, т. к. он позволяет по спектральным характеристикам проводить идентификацию полос ИК-спектра и формулировать интерпретацию, используя значения интенсивности информативных полос в виде отношения между собой.

Для выявления диагностических признаков у родственных ископаемых (фитолейм) и современных (гербариев) растений были использованы микроскопия и методология СКАУФВ (структурно-кластерный анализ углефицированных веществ) на основе ИК-спектроскопии [13]. Цель представленных исследований заключалась в проведении сопоставления микроструктуры образцов и их атомарно-молекулярной организации в виде связей химических

элементов С, N, H, O, применяя результаты структурно-группового анализа (СГА) в виде количества связей этих элементов (структурно-элементный анализ) и баланса функциональных структурных единиц (ФСЕ) – структурообразующих кластеров, используя структурно-кластерный анализ (СКА).

Материал и методы

В качестве объектов исследования были выбраны фитолеймы – это фоссилизированные (мумифицированные и обугленные) остатки растений средне-позднеюрского возраста из наунакской свиты скважин Западной Сибири (Томская область), а также гербарии – мумифицированные образцы современных мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид, собранные преимущественно в окрестностях города Томска. Лишь современные гинкго привезены из Республики Корея (табл. 1). Все образцы хранятся в Томском политехническом университете.

В исследованиях эволюции растительного мира были применены подходы молекулярной палеонтологии, изучение проводилось по ИК-спектрам диффузного отражения с последующей обработкой программным комплексом (ПК ASPECT) для идентификации молекулярного строения углефицированных и углеродистых веществ сингенетических каустобиолитов (СКБЛ) и мумифицированных органических веществ.

Этой публикацией авторы обращают внимание на новые и перспективные возможности проведения исследований в таком направлении, как молекулярная палеоботаника, применяя разработанную в ТПУ методологию СКАУФВ. Проведённые ранее исследования структуры фитолейм хвощей, папоротников, гинкгоопсид, хвойных ИК-спектрометрическим методом уже показали эффективность использования спектров диффузного отражения для изучения молекулярной структуры этих веществ [15].

В представленной статье для выяснения особенностей строения растений разной степени фоссилизации, увязки их между собой по морфологии были использованы ФСЕ νOCO , νNH , νCH , νCCN , νCC , δNH , δCH , δCOC , отражающие внутримолекулярные и надмолекулярные связи. Впервые для этой цели был использован структурно-элементный анализ (СЭА) этих химических элементов в виде количества связей С-С, С-Н, С-О, С-N, N-H, N-O.

Последующее сопоставление результатов молекулярной палеонтологии, морфологического и эпидермально-кутикулярного анализа остатков мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид (порядки гинкговых и чекановские) средне-позднеюрского возраста и современных мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид (только порядок гинкговых, поскольку порядок чекановские вымершие растения) позволило выявить признаки и закономерности эволюции растительного мира, идентифицировать структурные особенности исследуемых веществ и провести интерпретацию их происхождения.

Результаты и обсуждения

Полученные сведения о палеоботанических исследованиях свидетельствует о том, что состав древних растений качественно не отличался от состава современных растений [16]. Однако количественный СЭА характеризует влияние процесса фоссилизации на число и вид структурообразующих связей.

Среди мхов изучались образцы рода *Hepaticites* sp. средне-позднеюрского возраста из скважин площади Снежная Томской области и современные мхи рода *Sphagnum* sp. из окрестностей города Томска (рис. 1, а, б). Из графика видно, что все имеющиеся связи изменяются. Количество связей С-N и С-O идёт в сторону увеличения в процентном соотношении от древних к современным (рис. 1, в). Количество остальных связей от древних к современным изменяется в сторону уменьшения.

Среди хвощей в исследованиях рассматривались представители рода *Equisetites* sp. средне-позднеюрского возраста из скважин площадей Майская и Снежная Томской области и современные хвощи рода *Equisetum* sp. из окрестностей города Томска (рис. 2, а, б). Ткань хвощевых растений при фоссилизации в виде остатка значительно преобразуется. В частности, на примере юрских и современных экземпляров видно, что структура углефицированного вещества хвощей формируется за счёт рекомбинации связей С-N и С-O, т. е. за счёт этих связей частично образуются каркасные соединения (С-С), а в основном появляются новые углеводородные связи (С-H). В количественном отношении связи N-H, N-O в образцах фитолейм также преобладают значительно в сравнении аналогичными связями в образце гербария (рис. 2, в).

Таблица 1. Классификация изученных растений [14]

Table 1. Classification of the studied plants [14]

Отдел/Division	Класс/Class	Порядок/Order	Род/Genus
Bryophyta	Bryopsida	–	<i>Hepaticites</i> MZ; <i>Sphagnum</i> KZ
Equisetophyta	Equisetopsida	–	<i>Equisetites</i> MZ; <i>Equisetum</i> KZ
Polypodiophyta	Polypodiopsida	–	<i>Coniopteris</i> MZ; <i>Pteridium</i> KZ
Pinophyta	Ginkgoopsida	Ginkgoales MZ-KZ	<i>Ginkgo</i> MZ-KZ
		Czekanowskiales MZ	<i>Czekanowskia</i> MZ; <i>Phoenicopsis</i> MZ

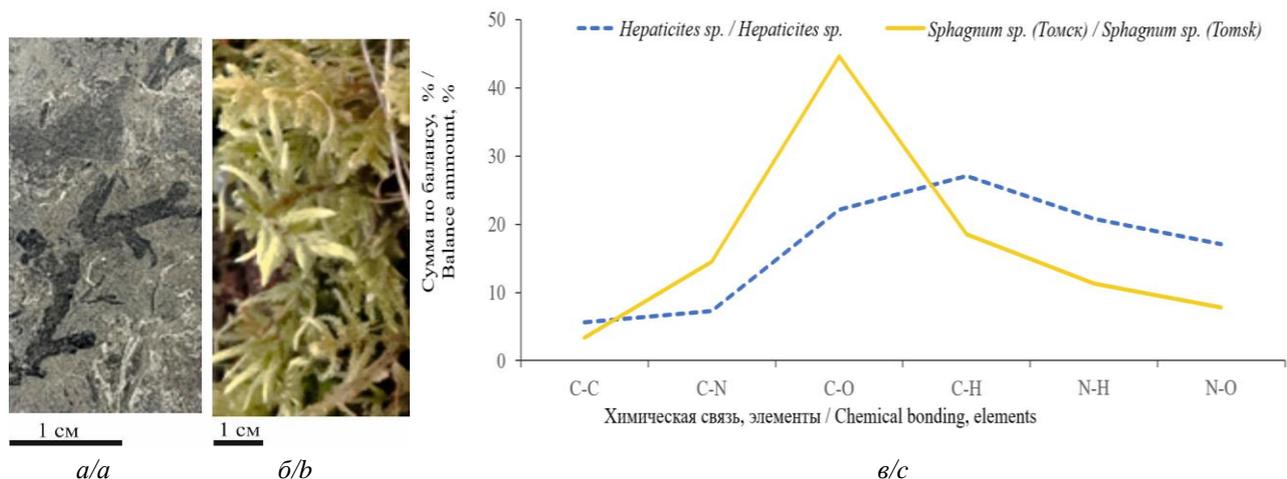


Рис. 1. а) *Hepaticites* sp. (пл. Снежная, 626, гл. 2474,59 м, обр. 72/940); б) *Sphagnum* sp. (г. Томск, обр. 72/927); коллекция ТПУ; в) график соотношения структур по балансу ФСЕ на основе группового анализа растений по видам связи элементов C, N, O, H между собой

Fig. 1. а) *Hepaticites* sp. (area Snezhnaya, 626, depth 2474.59 m, sample 72/940); б) *Sphagnum* sp. (Tomsk city, sample 72/927); TPU collection; в) graph of the relationship of structures according to the balance of functional structural units (FSU) based on group analysis of plants according to the types of connections between elements C, N, O, H

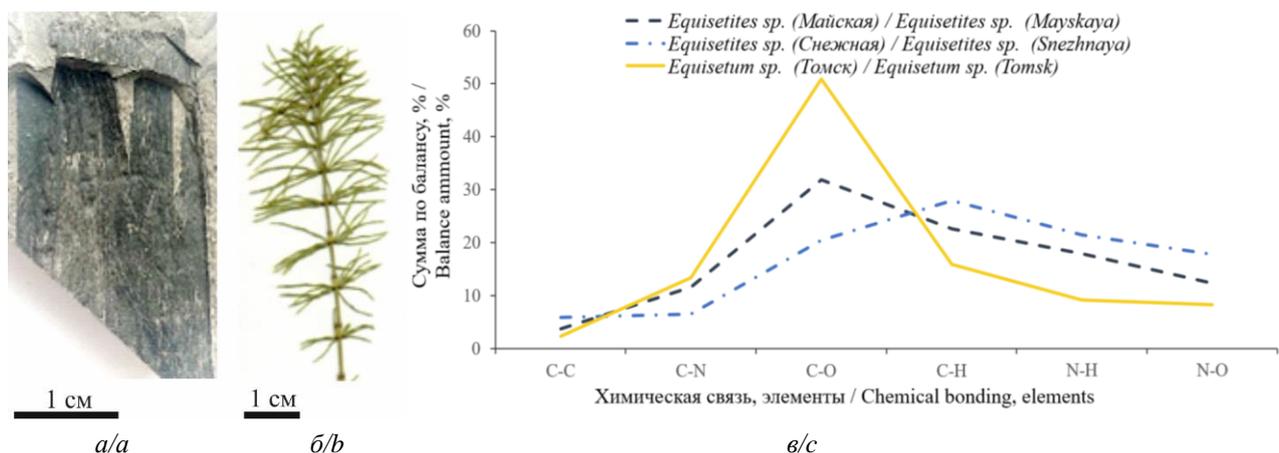


Рис. 2. а) *Equisetites* sp. (пл. Снежная, 135, гл. 2491,3 м, обр. 72/226); б) *Equisetum* sp. (г. Томск, обр. 72/924); коллекция ТПУ; в) график соотношения структур по балансу ФСЕ на основе группового анализа растений по видам связи элементов C, N, O, H между собой

Fig. 2. а) *Equisetites* sp. (area Snezhnaya, 135, depth 2491.3 m, sample 72/226); б) *Equisetum* sp. (Tomsk city, sample 72/924); TPU collection; в) graph of the relationship of structures according to FSU balance based on group analysis of plants according to the types of connections between elements C, N, O, H

Проведённый структурно-кластерный анализ по ФСЕ по частям строения хвощей (листья, стебли и их смесь) показал, что листья и стебли значительно различаются между собой. На графике видно, что для листьев и стебля неизменными остаются ФСЕ с кластерными связями ν_{CC} , δ_{CH} , δ_{NH} , а внутримолекулярных связей ФСЕ ν_{CCN} и ν_{OCO} в листьях заметно меньше, тем самым по конфигурации они не тождественны друг другу. Из этого сравнения видно, что структура органической смеси из стеблей и листьев растений ближе к структуре листьев (рис. 3).

При изучении образцов угля среднеюрского возраста, полученных из скважин площади Снежная Томской области, и подстилающих его хвощей *Equisetites* sp. выяснено, что связи C-C, C-N, C-O, N-H остаются близкими по значению [17], а вот углеводородная составляющая в виде связей C-H меньше при сравнении угля и фитолеймы. По конфигурации графиков можно предположить высокую степень насыщенности угля хвощевыми остатками (рис. 4).

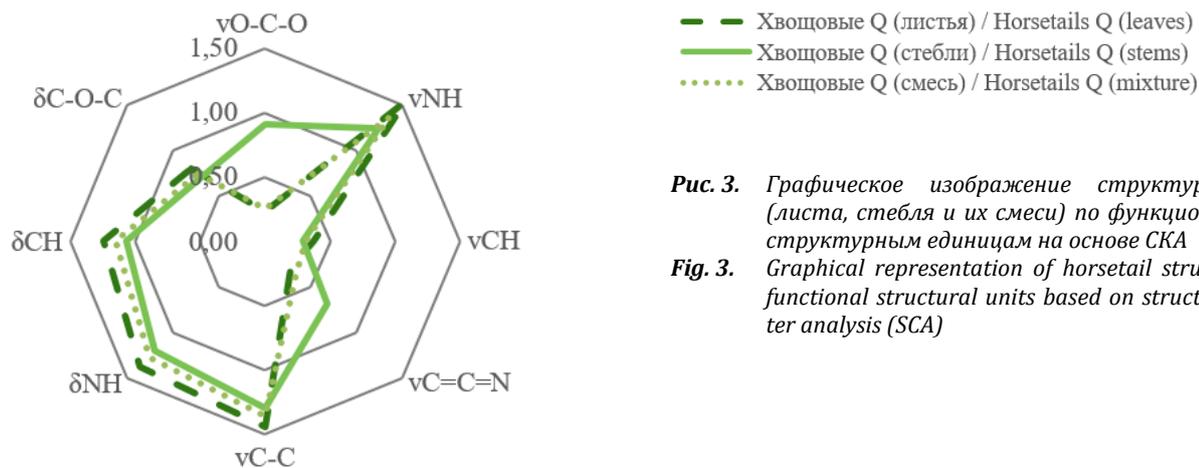


Рис. 3. Графическое изображение структур хвоща (листа, стебля и их смеси) по функциональным структурным единицам на основе СКА
Fig. 3. Graphical representation of horsetail structures by functional structural units based on structural cluster analysis (SCA)

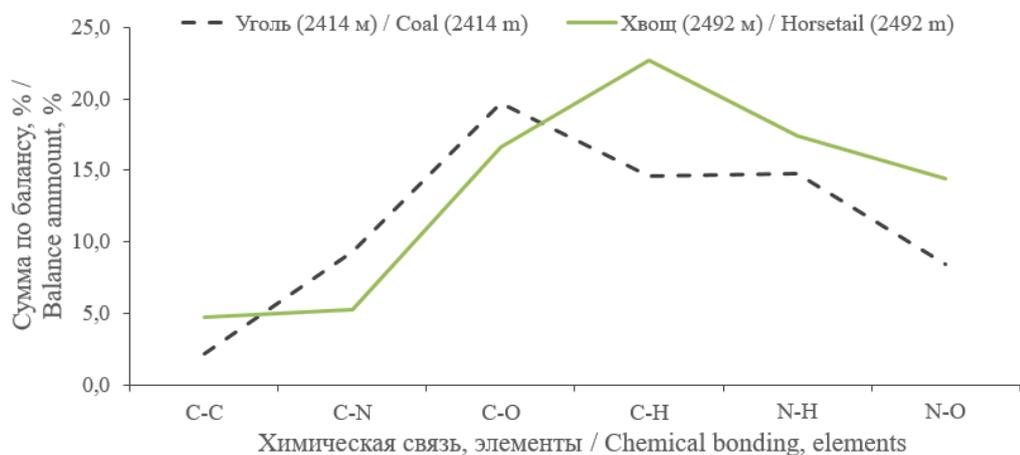


Рис. 4. Сравнение угля и подстилающих его хвощей скважин площади Снежная (Томская область)
Fig. 4. Comparison of coal and its underlying horsetail wells in Snezhnaya area (Tomsk region)

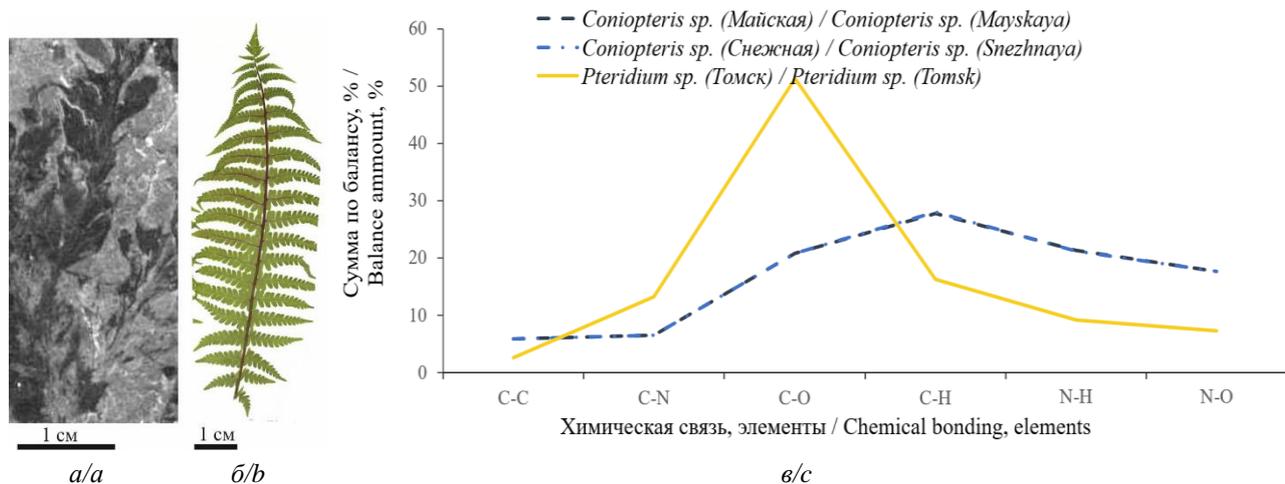


Рис. 5. а) *Coniopteris* sp. (пл. Майская, 569, гл. 3791,0 м, обр. 72/324а); б) *Pteridium* sp. (г. Томск, обр. 72/918); коллекция ТПУ; в) график соотношения структур по балансу ФСЕ на основе группового анализа растений по видам связи элементов С, N, O, H между собой
Fig. 5. а) *Coniopteris* sp. (пл. Mayskaya, 569, depth 3791.0 m, sample 72/324a); б) *Pteridium* sp. (Tomsk city, sample 72/918); TPU collection; в) graph of the relationship of structures according to FSU balance based on group analysis of plants according to the types of connections between elements C, N, O, H

При обугливании структура папоротников претерпевает изменения [18]. Для сравнительного исследования были взяты папоротники рода *Coniopteris* sp. средне-позднеюрского возраста из скважин площадей Майская и Снежная Томской области и современные папоротники рода *Pteridium* sp. из окрестностей города Томска (рис. 5, а, б).

Отмечается увеличение в процентном соотношении от древних к современным растениям количества связей С-Н и С-О, при уменьшении количества связей С-С, С-Н, N-H, N-O (рис. 5, в).

Проведённый сравнительный анализ количества ФСЕ в образцах папоротников показал, что листья и рахис различаются кластерными связями ν_{CC} и δ_{NH} , они же являются основными признаками для оценки строения смеси, потому что по ФСЕ ν_{CCN} и ν_{OCO} у них полное сходство (рис. 6). Эта особенность является существенным отличительным признаком папоротников и хвощовых.

Среди гинкгоопсид изучались образцы родов *Ginkgo* sp., *Czekanowskia* sp. и *Phoenicopsis* sp. среднеюрского возраста из скважин площадей Двойная, Казанская и Рыбальная Томской области и современные реликтовые представители рода *Ginkgo biloba* L. из Республики Корея (рис. 7, а–г). Тенденция изменения количества связей С-Н и С-О такая же, как и у мхов, хвощовых и папоротников. На графиках видно, что конфигурация структуры фитолейм среднеюрских гинкгоопсид (гинкговых и чекановские) в сравнении с современными *Ginkgo biloba* L. сохраняется. В основном за счёт

этих связей происходит рекомбинация в структуре растительного остатка, в котором количество связей С-Н, N-H, N-O уменьшается в данной последовательности, но их количество больше, чем в образце гербария (рис. 8).

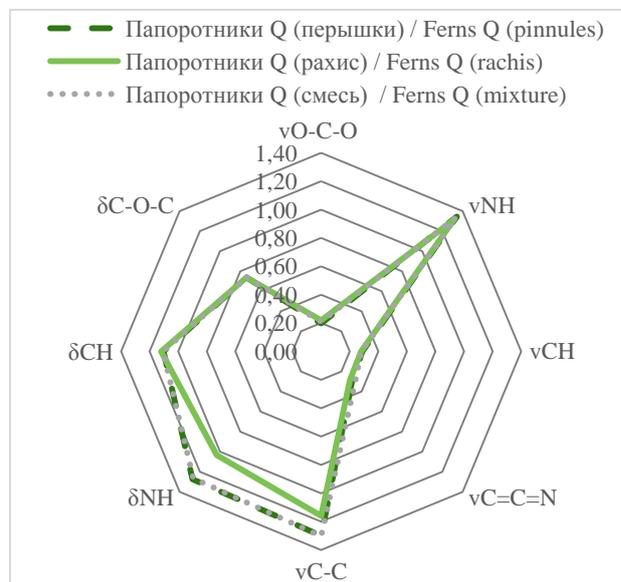


Рис. 6. Графическое изображение структур папоротника по функциональным структурным единицам на основе СКА

Fig. 6. Graphical representation of fern structures by functional structural units based on SCA

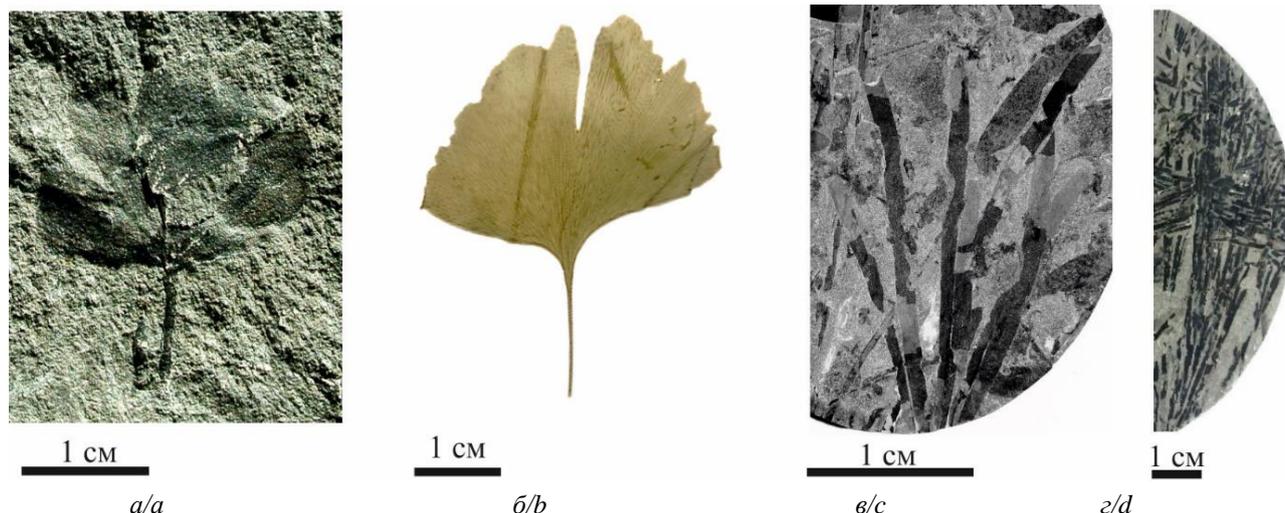


Рис. 7. а) *Ginkgo* sp. (пл. Двойная, 5, гл. 3250,0 м, обр. 72/269); б) *Ginkgo biloba* L. (Республика Корея, обр. 72/923); в) *Phoenicopsis* sp. (пл. Рыбальная, 409, гл. 2485,15 м, обр. 72/853); г) *Czekanowskia* sp. (пл. Казанская, 18, гл. 2503,9 м, обр. 72/744); коллекция ТПУ

Fig. 7. а) *Ginkgo* sp. (area Dvoynaya, 5, depth 3250.0 m, sample 72/269); б) *Ginkgo biloba* L. (Republic Korea, sample 72/923); в) *Phoenicopsis* sp. (area Rybalnaya, 409, depth 2485.15 m, sample 72/853); г) *Czekanowskia* sp. (area Kazanskaya, 18, depth 2503.9 m, sample 72/744); TPU collection

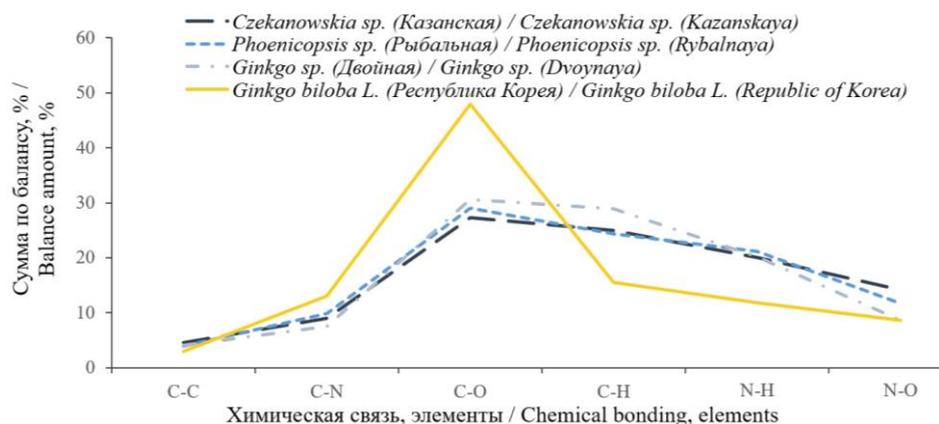


Рис. 8. График соотношения структур гинкгоопсид по балансу ФСЕ на основе группового анализа растений по видам связи элементов C, N, O, H между собой

Fig. 8. Graph of the relationship of structures according to FSU balance based on group analysis of plants according to the types of connections between elements C, N, O, H

Итак, сравнительный анализ показал, что существуют отличительные признаки, которые можно использовать в качестве диагностических признаков (в виде биомаркеров) структурных элементов строения материи на разном уровне её проявления. По спектральной характеристике видно различие строения органических веществ по показателям структурно-группового анализа в виде функциональных групп химических элементов C, N, H, O и структурно-кластерного анализа в виде функциональных структурных единиц – кластеров [19–21]. По результатам сравнительного анализа установлено, что по спектральным показателям функциональных структурных единиц можно проследить структурную изменчивость родственных таксонов.

Выяснено, что количество связей C-N и C-O у изученных мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид больше в современных растениях, чем в юрских. Количество связей C-N варьирует от 5 до 15 % от общего количества связей у юрских и современных растений соответственно, а количество связей C-O у юрских растений держится на уровне 20–25 %, увеличиваясь к 45–50 % у современных. Это подтверждает известную закономерность процесса углефикации, когда растительные остатки, преобразуясь в углефицированные вещества, теряют молекулярную влагу в виде кислородных соединений O-C-O и частично обогащаются азотом. При этом морфологическое строение растений не меняется.

Количество связей C-C, C-H, N-H, N-O у всех изученных растений, наоборот, уменьшается (C-C на 3–5 %, остальных на 10 %). Эти связи являются неустойчивыми и поэтому не сохраняются в потомственных организмах.

Кроме этого, было установлено структурное различие углефицированных веществ фитолеймы хвоща и угля по количеству связей C-H при близких значениях количества связей C-C, C-N, C-O, N-H.

Выводы

Изучение структуры растений – мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид как среднепозднеюрских, так и современных, с помощью ИК-спектроскопии даёт качественную и количественную информацию о специфических структурных элементах построения материи.

С применением методологии СКАУФВ диагностика проводится по количеству функциональных структурных единиц, что позволяет различать остатки растений и относить их к определённым группам древних и современных растений.

В частности, проведённые исследования современных и средне-позднеюрских фитолейм мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид показали, что может происходить рекомбинация связей C-N и C-O на связи C-H, N-H, N-O.

Отмечается молекулярное отличие листа от стебля хвощей и папоротников. В хвощевых отличительным признаком служит количество ФСЕ ν_{CC} и ν_{OCO} , а в папоротниках основными признаками являются кластеры ν_{CC} и δ_{NH} , и эта структурная особенность может служить диагностическим критерием в молекулярной палеоботанике.

Сравнительный анализ углефицированного вещества фитолеймы и угля из скважины Снежная на площади Томской области *Equisetites* sp. показал, что количество связей C-C, C-N, C-O, N-H в веществах образцов близкое, а количество C-H связей в фитолейме хвоща больше.

Таким образом, результаты применения ИК-спектроскопии диффузного отражения, полученные на исследовании молекулярных структур родственных среднепозднеюрских и современных растений (мхов, хвощей, папоротников и гинкгоопсид), открывают новые возможности в области молекулярной палеонтологии, а именно, выявлены диагностические признаки, наиболее информативные при идентификации углефицированных осадков, что важно в понимании эволюции высших растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кальвин М. Химическая эволюция: молекулярная эволюция, ведущая к возникновению живых систем на Земле и на других планетах / пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 240 с.
2. Schweitzer M.H. Molecular paleontology: some current advances and problems // *Annales de paleontologie*. – 2004. – Vol. 90. – № 2. – P. 81–102. DOI: 10.1016/j.annpal.2004.02.001.
3. Современная палеонтология. Методы, направления, проблемы, практическое приложение: справочное пособие: В 2-х т. / под ред. В.В. Меннера, В.П. Макридина. – М.: Недра, 1988. – Т. 2. – 383 с.
4. Pan Y. Molecular paleontology as an exciting, challenging and controversial field // *National Science Review*. – 2020. – Vol. 7. – № 4. – P. 823. DOI: 10.1093/nsr/nwaa001.
5. Evidence of proteins, chromosomes and chemical markers of DNA in exceptionally preserved dinosaur cartilage / A.M. Bailleul, W. Zheng, J.R. Horner, B.K. Hall, C.M. Holliday, M.H. Schweitzer // *National Science Review*. – 2020. – Vol. 7. – Iss. 4. – P. 815–822. DOI: 10.1093/nsr/nwz206.
6. Chemistry and analysis of organic compounds in dinosaurs / M. Tahoun, M. Engeser, V. Namasivayam, P.M. Sander, C.E. Müller // *Biology*. – 2022. – Vol. 11. – Iss. 5. – P. 670. DOI: 10.3390/biology11050670.
7. Soft-tissue, rare earth element, and molecular analyses of *Dreadnoughtus schrani*, an exceptionally complete titanosaur from Argentina / E.R. Schroeter, P.V. Ullmann, K. Macauley, R.D. Ash, W. Zheng, M.H. Schweitzer, K.J. Lacovara // *Biology*. – 2022. – Vol. 11. – Iss. 8. – P. 1158. DOI: 10.3390/biology11081158.
8. Ayala J.D., Schroeter E.R., Schweitzer M.H. Porphyrin-based molecules in the fossil record shed light on the evolution of life // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14. – Iss. 2. – P. 201. DOI: 10.3390/min14020201.
9. Molecular fossils within bitumens and kerogens from the ~1 Ga Lakhanda Lagerstätte (Siberia, Russia) and their significance for understanding early eukaryote evolution / J.P. Duda, H. König, M. Reinhardt et al. // *PalZ*. – 2021. – Vol. 95. – P. 577–592. DOI: 10.1007/s12542-021-00593-4.
10. Gomes W.A., Machado M.F., Alves E.F. Exceptional preservation of nonmineralized biomaterials in Cenozoic fossils of the Mammalia clade // *Research, Society and Development*. – 2022. – Vol. 11. – № 14. – P. 23. DOI: 10.33448/rsd-v11i14.36739.
11. Attenuated total reflection Fourier Transform Infrared (ATR FT-IR) Spectroscopy sensitivity to the thermal decay of bone collagen / B. Thomas, K. Anderson, I. de Silva et al. // *Applied Spectroscopy*. – 2023. – Vol. 77. – Iss. 1. – P. 53–61. DOI: 10.1177/00037028221135634.
12. Alves E.F., Gomes W.A. Preservacao de biomoleculas no registro fossil de vegetalis: estado da arte da Paleobotanica molecular // *Quaternary International*. – 2024. – Vol. 20. – P. 15. DOI: 10.20396/td.v20i00.8676195.
13. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 590 с.
14. Киричкова А.И., Костина Е.И., Быстрицкая Л.И. Фитостратиграфия и флора юрских отложений Западной Сибири. – СПб.: Недра, 2005. – 378 с.
15. Иванов В.П., Рычкова И.В. Палеонтологическая и спектрометрическая характеристика фитолейм средне-позднеюрских растений юго-востока Западной Сибири // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. – 2021. – Т. 29. – № 6. – С. 84–95.
16. Каменева А.И., Платонов В.В. Теоретические основы химической технологии горючих ископаемых. – М.: Химия, 1990. – 287 с.
17. Иванов В.П. Эволюция растений-углеобразователей и флористическая восстановленность верхнепалеозойских углей // *Известия вузов. Геология и разведка*. – 2015. – № 5. – С. 25–31.
18. Development of the integrated approach to stratigraphic subdivision and correlation of Middle–Upper Jurassic deposits in Southeastern West Siberia / I.V. Rychkova, M.I. Shaminova, V.V. Anosov, V.P. Ivanov // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 2019. – Vol. 27. – P. 297–310. DOI: 10.1134/S0869593819030055.
19. Восстановленность и петрографический состав углей Кузнецкого бассейна / В.П. Иванов, А.С. Станкевич, М.Б. Школлер и др. // *Химия твёрдого топлива*. – 2002. – № 4. – С. 3–19.
20. Иванов В.П., Школлер М.Б., Станкевич А.С. Изменение структурных характеристик и свойств кузнецких углей разной степени метаморфизма и восстановленности в процессе их окисления // *Кокс и химия*. – 2002. – № 5. – С. 4–11.
21. Modes of occurrence of germanium and tungsten in the Spetsugli germanium ore field, Pavlovka brown coal deposit, Russian Far East / S.I. Arbuzov, D.A. Spears, S.S. Penok, I.Yu. Chekryzhov, V.P. Ivanov // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – Vol. 132. – 103986, p. 14. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.103986.

Информация об авторах

Владимир Петрович Иванов, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; ivp2005@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7468-0174>

Ирина Владимировна Рычкова, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; irina.rychkova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3779-5754>

Марина Геннадьевна Пахтаева, аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; mgr3@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0003-8451-8068>

Поступила в редакцию: 14.04.2025

Поступила после рецензирования: 07.05.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

REFERENCES

1. Calvin M. *Chemical evolution: molecular evolution leading to the emergence of living systems on Earth and on other planets*. Moscow, Mir Publ., 1971. 240 p. (In Russ.)
2. Schweitzer M.H. Molecular paleontology: some current advances and problems. *Annales de paleontologie*, 2004, vol. 90, no. 2, pp. 81–102. DOI: 10.1016/j.annpal.2004.02.001.
3. Shishkin M.M., Meyen S.V., Alekseev A.S. *Modern paleontology. Methods, directions, problems, practical application*, Moscow, Nedra Publ., 1988, vol. 2, 383 p. (In Russ.)
4. Pan Y. Molecular paleontology as an exciting, challenging and controversial field. *National Science Review*, 2020, vol. 7, no. 4, p. 823. DOI: 10.1093/nsr/nwaa001.
5. Bailleul A.M., Zheng W., Horner J.R., Hall B.K., Holliday C.M., Schweitzer M.H. Evidence of proteins, chromosomes and chemical markers of DNA in exceptionally preserved dinosaur cartilage. *National Science Review*, 2020, vol. 7, Iss. 4, pp. 815–822. DOI: 10.1093/nsr/nwz206.
6. Tahoun M., Engeser M., Namasivayam V., Sander P.M., Müller C.E. Chemistry and Analysis of Organic Compounds in Dinosaurs. *Biology*, 2022, vol. 11, Iss. 5, p. 670. DOI: 10.3390/biology11050670.
7. Schroeter E.R., Ullmann P.V., Macauley K., Ash R.D., Zheng W., Schweitzer M.H., Lacovara K.J. Soft-tissue, rare earth element, and molecular analyses of *Dreadnoughtus schrani*, an exceptionally complete titanosaur from Argentina. *Biology*, 2022, vol. 11, Iss. 8, p. 1158. DOI: 10.3390/biology11081158.
8. Ayala J.D., Schroeter E.R., Schweitzer M.H. Porphyrin-based molecules in the fossil record shed light on the evolution of life. *Minerals*, 2024, vol. 14, Iss. 2, 201 p. DOI: 10.3390/min14020201.
9. Duda J.P., König H., Reinhardt M. Molecular fossils within bitumens and kerogens from the ~1 Ga Lakhanda Lagerstätte (Siberia, Russia) and their significance for understanding early eukaryote evolution. *PalZ*, 2021, vol. 95, pp. 577–592. DOI: 10.1007/s12542-021-00593-4.
10. Gomes W.A., Machado M.F., Alves E.F. Exceptional preservation of nonmineralized biomaterials in Cenozoic fossils of the Mammalia clade. *Research, Society and Development*, 2022, vol. 11, no. 14, p. 23. DOI: 10.33448/rsd-v11i14.36739.
11. Thomas B., Anderson K., De Silva I. Attenuated total reflection Fourier Transform Infrared (ATR FT-IR) Spectroscopy sensitivity to the thermal decay of bone collagen. *Applied Spectroscopy*, 2023, vol. 77, Iss. 1, pp. 53–61. DOI: 10.1177/00037028221135634.
12. Alves E.F., Gomes W.A. Preservacao de biomoleculas no registro fossil de vegetalis: estado da arte da Paleobotanica molecular. *Quaternary International*, 2024, vol. 20, p. 15. DOI: 10.20396/td.v20i00.8676195.
13. Bellamy L. *Infrared spectra of complex molecules*. Translated from English. Moscow, Foreign Languages Publ. House, 1963. 590 p. (In Russ.)
14. Kirichkova A.I., Kostina E.I., Bystritskaya L.I. *Phytostratigraphy and flora of Jurassic deposits of Western Siberia*. St. Petersburg, Nedra Publ., 2005. 378 p. (In Russ.)
15. Ivanov V.P., Rychkova I.V. Paleontological and spectrometric characteristics of phytoliums of Middle-Late Jurassic plants of the South-east of Western Siberia. *Stratigraphy. Geological correlation*, 2021, vol. 29, no. 6, pp. 84–95. (In Russ.)
16. Kameneva A.I., Platonov V.V. *Theoretical foundations of chemical technology of combustible minerals*. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 287 p. (In Russ.)
17. Ivanov V.P. Evolution of carbon-forming plants and floristic restoration of Upper Paleozoic coals. *Izvestiya vuzov. Geology and exploration*, 2015. no. 5, pp. 25–31. (In Russ.)
18. Rychkova I.V., Shaminova M.I., Anosov V.V., Ivanov V.P. Development of the Integrated Approach to stratigraphic subdivision and correlation of Middle–Upper Jurassic deposits in Southeastern West Siberia. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2019, vol. 27, pp. 297–310. DOI: 10.1134/S0869593819030055.
19. Ivanov V.P., Stankevich A.S., Shkoller M.B. and others. Recovery and petrographic composition of coals of the Kuznetsk basin. *Chemistry of solid fuels*, 2002, no. 4, pp. 3–19. (In Russ.)
20. Ivanov V.P., Shkoller M.B., Stankevich A.S. Changes in the structural characteristics and properties of Kuznetsk coals of varying degrees of metamorphism and reduction during their oxidation. *Coke and Chemistry*, 2002, no. 5, pp. 4–11. (In Russ.)
21. Arbutov S.I., Spears D.A., Ilenok S.S., Chekryzhov I.Yu., Ivanov V.P. Modes of occurrence of germanium and tungsten in the Spetsugli germanium ore field, Pavlovka brown coal deposit, Russian Far East. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 132, p. 14. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.103986.

Information about the authors

Vladimir P. Ivanov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ivp2005@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7468-0174>

Irina V. Rychkova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. irina.rychkova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-3779-5754>

Marina G. Pakhtaeva, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mgp3@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0003-8451-8068>

Received: 14.04.2025

Revised: 07.05.2025

Accepted: 16.06.2025