

УДК: 552.545, 532.531, 470.12

## СТРОЕНИЕ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ТРАВЕРТИНОВОГО ОБЪЕКТА ВАСЬКИН КЛЮЧ (р. СУХОНА, ВОЛОГОДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Т.Г. Шумилова, С.И. Исаенко, Н.В. Яшин

*Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская 54, г. Сыктывкар, 167982 Россия;  
shumilova@geo.komisc.ru*

## STRUCTURE AND MINERAL CHARACTERISTICS OF TRAVERTINE OBJECT VAS'KIN KLYUCH (SUKHONA RIVER, VOLOGDA DISTRICT)

T.G. Shumilova, S.I. Isaenko, N.V. Yashin

*Institute of Geology Komi SC UB RAS, ul. Pervomaiskaya 54, Syktyvkar, 167982 Russia;  
shumilova@geo.komisc.ru*

В работе приводятся результаты исследований уникального геологического памятника природы – холодного травертинообразующего источника Васькин ключ с каскадным водопадом (бассейн р. Сухона, Вологодская область). Впервые установлено, что отложение карбонатов начинается непосредственно от истока и происходит на протяжении всего ручья. Определены геолого-морфологическая специфика объекта, четыре типичные зоны травертинообразования, классификационная принадлежность и генетическая специфика объекта. Исследован вещественный состав травертинов вдоль профиля водотока. Установлены неоднородный состав травертинов и изотопное фракционирование углерода и кислорода при конденсации в кальцит и доломит. Сделан вывод о том, что источник Васькин ключ может рассматриваться как эталонный объект холодного метеорного происхождения, а также как объект для изучения механизма влияния растений на процесс травертинообразования.

Илл. 4. Табл. 2. Библ 24.

*Ключевые слова:* травертин, гидротермальные источники, холодные источники, водопад, минералогия карбонатов

The results of studies of a unique geological nature sanctuary – a cold travertine spring Vas'kin Klyuch with cascade waterfalls (the basin of the Sukhona River, Vologda district) are presented in the paper. For the first time, the carbonate condensation is described along the spring profile beginning from the stream source. The geological and morphological features, four typical travertine-producing zones, classification characteristics and genetic specificity of the spring are established. The chemical composition of travertines along the spring profile is studied. The nonuniform composition of travertines and isotope fractionation of carbon and oxygen during condensation to calcite and dolomite are found. It is concluded that the spring can be used as a standard object of cold meteoric origin and also for study of mechanism of plants influence to the process of travertines formation.

Figures 4. Tables 2. References 24.

*Key words:* travertine, hydrothermal spring, cold spring, falls, mineralogy of carbonates

### Введение

Травертины являются одним из интереснейших объектов исследований, которые, с одной стороны, кажутся достаточно простыми, а с другой – загадочными, порой уникально привлекательными и удивительными, многие из них являются природными памятниками, местами туристическо-

го паломничества (Dilsiz et al., 2004) или объектами интенсивного исследования и использования (Altunel, Hancock, 1993; Юшкин, 1994; Pentecost, 1995; Minissale et al., 2002; Лепокурова, 2005; Omelon et al., 2006; Бычков и др., 2007; Складаров и др., 2007; Шумилова, Данилова, 2009; Crossey et al., 2009; Gibert et al., 2009; Семенов, 2011). Гидротермальные источники широко распространены

(Lund et al., 2005), известны также многочисленные холодные источники, в частности, на территории Сысольского свода Волго-Уральской антеклизы (Митюшева, 2013). С геологической точки зрения травертины представляют собой объект для палео-гидрогеологических генетических реконструкций (Лаврушин и др., 2006).

Одной из их особенностей является возможность непосредственного наблюдения за процессом их образования, т.к. многие из них приурочены к действующим травертинообразующим гидротермальным и холодным источникам. Последнее обстоятельство позволяет произвести моделирование отдельных породообразующих процессов и механизмов, воспользовавшись естественными природными лабораториями. Источник Васькин ключ (бассейн р. Сухона, Вологодская область) известен как объект, на котором можно детально изучить процесс современного травертинообразования в холодных условиях. Целью исследований было детальное изучение строения объекта уникального геологического памятника природы, выяснение его генетической специфики.

#### **Объект и методика исследований**

Источник Васькин ключ (60° 35' 68.8" с.ш., 45° 16' 95.8") в.д. имеет разгрузку в виде живописного каскадного водопада и находится на левом берегу р. Сухона в 7 км выше по течению от пос. Полдарса, напротив устья руч. Чернушка (Северо-Западный федеральный округ, Вологодская область, Великоустюгский район). Согласно Решению Вологодского облисполкома от 17.04.87 № 217 (Постановление Правительства от 16.12.08 № 2394) он имеет официальный статус уникального геологического объекта регионального значения и значится как многоступенчатый водопад со слабоминерализованным источником.

Нами объект изучен непосредственно от истока до впадения в р. Сухона с выявлением и детальным описанием характерных зон, отличающихся локальным рельефом, относительной скоростью течения потока, спецификой отложения карбонатов по их мощности и структурно-текстурным характеристикам. Полевые наблюдения были проведены в сентябре 2009 г. и сопровождались отбором пленочных карбонатных образований и штучных образцов травертинов вдоль профиля объекта для лабораторных исследований.

Структурно-вещественный анализ травертинов исследован комплексом минералого-петрогра-

фических методов с использованием оборудования ЦКП «Геонаука» (ИГ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар). Для установления источника вещества при образовании травертинов источника Васькин ключ и анализа возможной зональности травертинового профиля нами выполнен изотопный анализ углерода и кислорода карбонатов из различных зон профиля травертинового поля и вмещающих пород. Изотопный состав  $d^{18}O$  и  $\delta^{13}C$  карбонатов травертинов определен на масс-спектрометре Finnigan DeltaV Advantage (Германия), Isotope Ratio MS. Разложение карбонатов и измерение изотопного состава углерода и кислорода в режиме непрерывного потока произведено на аналитическом комплексе, включающем в себя систему подготовки и ввода проб Gas Bench II, соединенную с масс-спектрометром DELTA V Advantage. Значения  $\delta^{13}C$  указаны в промиллях относительно стандарта PDB,  $\delta^{18}O$  – стандарта SMOW. Погрешность определений  $d^{18}O$  – не более  $\pm 0.2$  ‰, для  $\delta D$  –  $\pm 0.5$  ‰ (аналитик И.В. Смолева). Карбонатный анализ выполнен в лаборатории химии минерального сырья ИГ Коми НЦ УрО РАН (аналитик О.В. Кокшарова). Фазовый минеральный состав карбонатов подтвержден с помощью рамановской спектроскопии с использованием спектрометра LabRamHR 800 (Horiba Yuvon Jobin).

#### **Краткое описание истории изучения объекта**

Планомерное геолого-гидрологическое изучение недр Вологодской области началось с конца 50-х годов. В период с 1959 по 1982 гг. вся площадь области (145.7 тыс. кв. км) была охвачена полистной геолого-гидрогеологической, а с 1971 г. – групповой комплексной геолого-гидрогеологической съемкой масштаба 1:200 000. Петербургской КГЭ была изучена водоносность четвертичных и дочетвертичных пород, проведено районирование территории по степени обеспеченности пресными подземными водами, изучены минеральные воды, составлены гидрогеологические и гидрохимические карты. Большой вклад в изучение гидрогеологического строения области внесли Н.Е. Андреева, Н.Е. Бителева, Е.А. Шебеста, Л.Н. Полуэктов, Ю.В. Николаев и др. (Буслович и др., 2001). Одной из важных работ, в которой обобщены гидрогеологические и инженерно-геологические сведения по Вологодской области, является монография «Гидрогеология СССР Архангельская и Вологодская области» (Гидрогеология..., 1969).

Научно-исследовательские работы на источнике Васькин ключ проводились под руководством Н.П. Юшкина в 1994 и 2005 гг. (Юшкин, 1994; Плоскова, 2005; Плоскова, 2007). В результате исследования отложения татарского яруса верхней перми, кратко описан источник, изучена фоссилизация мха и отдельные аспекты образования травертина. Изучение геохимического состава вод показало его изменение со временем. Сделан вывод о том, что отложение карбоната происходит только в области водопада (Плоскова, 2005). Были высказаны опасения о возможности разрушения травертинового поля в результате сезонных колебаний состава вод ключа, действия талых вод и весеннего ледохода. Указывалось на необходимость проведения периодического мониторинга жизни источника и сохранности уникального геологического объекта.

### Краткое описание геологии района

Территория Вологодской области расположена в северо-западной части Русской плиты и характеризуется блочным строением и сложным расчлененным рельефом поверхности фундамента. В фундаменте выделяются пять мегаблоков земной коры – Олонецкий, Водлозерский, Кирилловский, Онегодвинский и Сухонский, отделенные друг от друга глубинными региональными разломами (Буслович и др., 2001). Мегаблоки различны по форме и размерам и разделены сетью разломов на блоки более высоких порядков. При формировании рельефа на данной территории важную роль играют глубинные разломы, определяющие положение, простирающие и амплитуду основных его морфоструктур и характер их сочленения.

В рельефе фундамента выделяются три крупные структурные элемента – Онежско-Сухонская моноклиналь юго-восточного склона Балтийского щита, Рослятинский грабен, являющийся частью Средне-Русского авлакогена, и, частично, Московская впадина, занимающая юго-восточную часть области (Буслович и др., 2001).

В геологическом строении района определяется отложениями девонского, каменноугольного, пермского, триасового, юрского, мелового и четвертичного периодов (рис. 1). В фундаменте выделяются три структурно-вещественных комплекса – архейский, архейско-нижнепротерозойский и нижнепротерозойский карельский, отличающиеся вещественным составом и степенью метаморфизма (Буслович и др., 2001).

Согласно принятому в настоящее время стратиграфическому расчленению (Постановление..., 2005) непосредственно в районе нахождения источника Васькин ключ развиты отложения уржумского и казанского ярусов биармийского отдела средней перми и татарского отдела верхней перми, сверху перекрывающиеся нижнетриасовыми терригенными пестроцветными отложениями.

Наиболее широко на поверхности территории представлена повсеместно развитая карбонатно-терригенная красноцветная толща татарского отдела, выходящая на поверхность в обнажениях по р. Сухоне и ее притокам – Малой и Большой Тотьме, Стрельне. В толще выделяются отложения северодвинского и вятского ярусов, характеризующиеся пестроокрашенными глинами, мергелями, алевролитами, песчаниками с прослоями известняков и доломитов. Уржумский ярус в составе нижнеустыньской и сухонской свит представлен песками, заглинованными песчаниками с мергелями, доломитами, известняками, глинами и гипсами. Казанский ярус представлен доломитами, известняками, глинами, алевролитами, гипсами и мергелями.

Признаки магматизма в районе источника Васькин ключ не установлены; разломы глубинного заложения и их опережающие, а также признаки древней и современной гидротермальной деятельности не наблюдаются (см. рис. 1).

### Результаты исследований

**Строение травертинового объекта.** Источник Васькин ключ разгружается в виде каскадного водопада, высота которого составляет около 10 м от уреза воды р. Сухона (рис. 2). Вода падает с обрывистого берега, сложенного переслаиванием белых и красноватых трещиноватых известковистых глин татарского яруса верхней перми видимой мощностью около 4 м, ниже, уже в зоне водопада, сменяющихся пачкой сильно трещиноватых известковистых глин серо-белого цвета видимой мощностью около 1 м. Ниже по склону разрез перекрыт осыпью (см. рис. 2).

Вода одной большой струей с ускорением выливается из узкого желоба диаметром около 15 см, и падает вниз под углом 60–70°, ниже распадаясь веером на несколько струй. Ближайшие смачиваемые участки склона покрыты мхом ярко-зеленого цвета, который ярко трассирует свежие образования травертинов в зоне водопада.

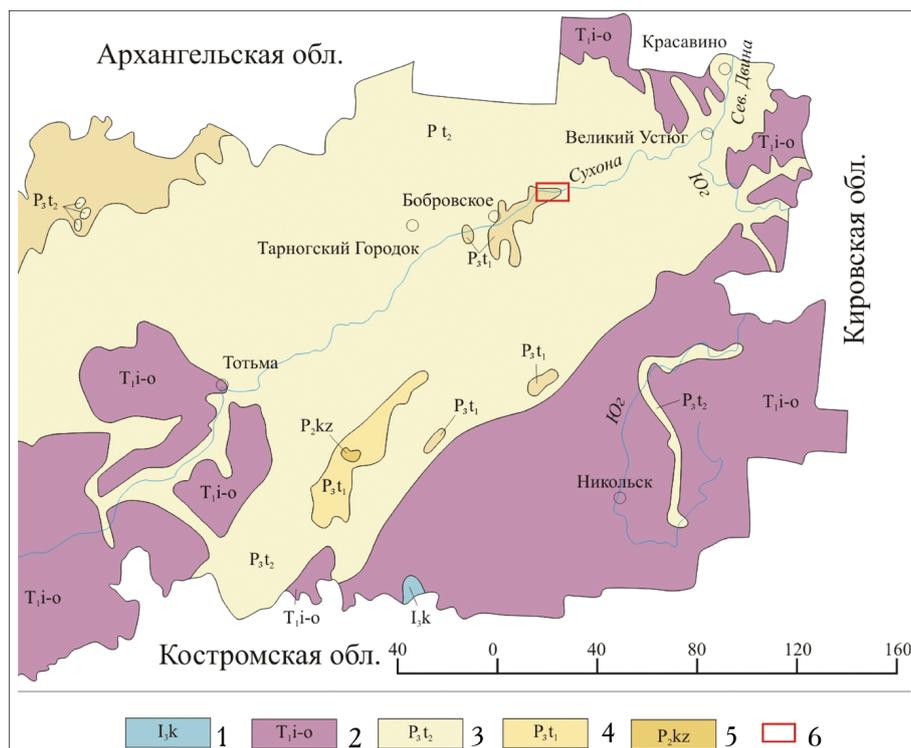


Рис. 1. Геологическая карта дочетвертичных отложений района исследований по (Буслович и др., 2001; Постановление, 2005).

1 – Келловейский ярус. Алевролиты, пески, песчаники, глины; 2 – Индский-оленецкий ярусы. Глины красноватые, алевролиты с линзами песков, песчаников и конгломератов; 3 – Татарский отдел. Верхний ярус. Глины пестроокрашенные, алевролиты, песчаники с прослоями известняков и доломитов; 4 – Татарский отдел. Нижний ярус. Пески, песчаники загипсованные с прослоями мергелей, доломитов, известняков, глин и гипсов; 5 – Казанский ярус. Доломиты, известняки, глины, алевролиты, мергели; 6 – район работ.

Fig. 1. Geological map of pre-Quaternary rock of the region studied after (Buslovich et al., 2001, Decision..., 2005).

1 – Callovian Stage; siltstones, sands, sandstones, clays; 2 – Induan-Olenekian stages; red clays, siltstones with lenses of sands, sandstones and conglomerates; 3 – Tatarian substage, upper stage; variegated clays, siltstones, sandstones with interlayers of limestones and dolomites; 4 – Tatarian Substage, lower stage; sands, sandstones with gypsum and interlayers of marls, dolomites, limestones, clays, and gypsum; 5 – Kazanian Substage; dolomites, limestones, clays, siltstones, marls; 6 – area of study.

Травертины источника выделяются морфологически и ярко трассируются зеленым мхом в зоне водопада, выше которого, как считалось ранее, кристаллический карбонатный осадок не образуется (Юшкин, 1994). Однако в результате наших исследований установлено, что кристаллические карбонаты формируются не только в зоне водопада, но и на протяжении всего ручья, начиная от выхода вод на поверхность (т.е. от истока), по бортам и под русловыми ступеньками ручья в области собственно водопада вплоть до зоны образования бактериальных матов. В связи с этим нами уточнено строение профиля травертинового поля и выделены четыре зоны, располагающиеся на различном удалении от истока ручья (см. рис. 2) и отличающиеся по интенсивности конденсации карбонатов, их структурно-текстурным, морфологическим осо-

бенностям и фазовому минеральному составу карбонатных образований, в том числе породообразующих травертинов.

*Первая зона* – зона начала осаждения карбонатов, начинается непосредственно от истока, выходит полосой шириной около 1.5 м по напластованию трещиноватых доломитов (рис. 3а). Здесь формируются карбонатные корочки светло-бежевого цвета на обломках пород различного состава (см. рис. 3б) и береговых кромках. Мощность карбонатных образований не превышает первые миллиметры. Зона простирается вплоть до точки начала формирования сильно пористых травертинов.

*Вторая зона* умеренного травертинообразования начинается в 18–20 м от истока и продолжается вплоть до точки отрыва водопада. Травертины фор-

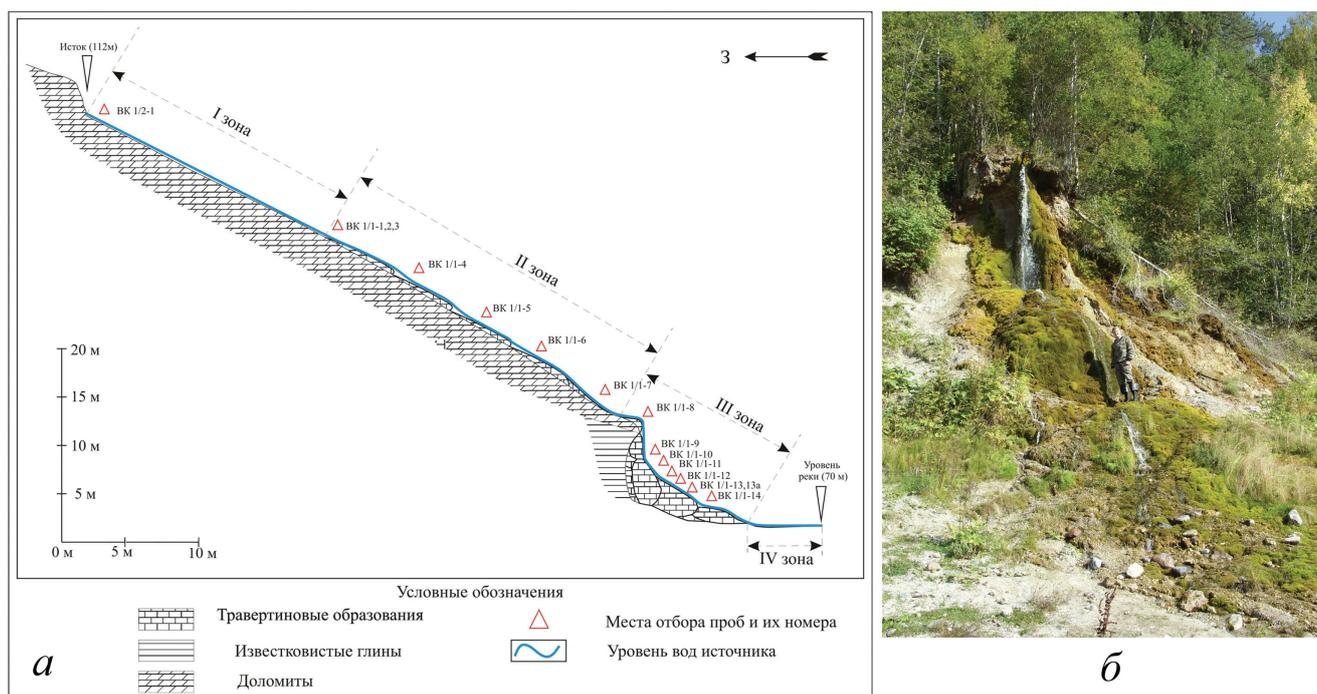


Рис. 2. Источник Васькин ключ.

а – геолого-морфологический профиль с зонами травертинообразования и точками отбора проб; б – фото III и IV зон источника – каскадный водопад.

Fig. 2. Vas'kin Klyuch spring.

а – geological-morphological profile with travertine zones and sampling points; б – photos of zones III and IV – cascade waterfall

мируются в русле ручья в полостях под ступеньками (см. рис. 3в), которые образуются в местах порогов и пустотах, образованных падением воды. Отмечаются также интенсивные карбонатные отложения по бортам ручья, в пещерах, образованных выпадением материала русла из трещин, и в полостях, выполненных карбонатными корками кремового цвета, которые образуют натечные формы и выполняют промежутки между обломками пород.

Травертины здесь сильно пористые темно-бежевого и серого цвета (см. рис. 3г), часто покрыты слоистой кальцитовый коркой мощностью до 5 мм. Карбонаты представлены пелитоморфным кальцитом. В порах травертинов часто сцементированы зерна кварца и органические остатки (обломки веток, части стеблей травянистых растений). Порода интенсивно ожежена. Эта зона является переходной от зоны образования тонких карбонатных корочек к зоне интенсивного травертинообразования.

Третья зона характеризуется наиболее интенсивным формированием травертинов. В современном профиле она начинается немного выше точки отрыва водопада, образуя в начале сложенный

карбонатами массивный гребень (см. рис. 3д) с каналом, углубляющимся ниже по течению главной струи, и практически смыкающимся в краевой точке в кольцо, где и находится место отрыва воды.

Самое интенсивное травертинообразование происходит, начиная с места контакта падающей воды с береговой поверхностью. В отличие от выше расположенной части профиля, вода здесь интенсивно разбрызгивается и стекает более прогретыми тонкими струями, а травертиновые образования достигают своей максимальной мощности – около 2 м. Порода имеет серо-бежевую окраску, пористую текстуру, но отличается от выше расположенных травертинов II зоны более плотным сложением. На внешней поверхности массивных травертинов часто встречается «окаменелый мох», образующийся в результате образования живописных агрегатов кальцита в виде его футляроподобных наростов на поверхности мха (см. рис. 3е). По мере дальнейшего формирования травертина пустоты в причудливых футляроподобных наростах кальцита на поверхности мха также выполняются карбонатами, и образуется очень плотная практически массивная порода.

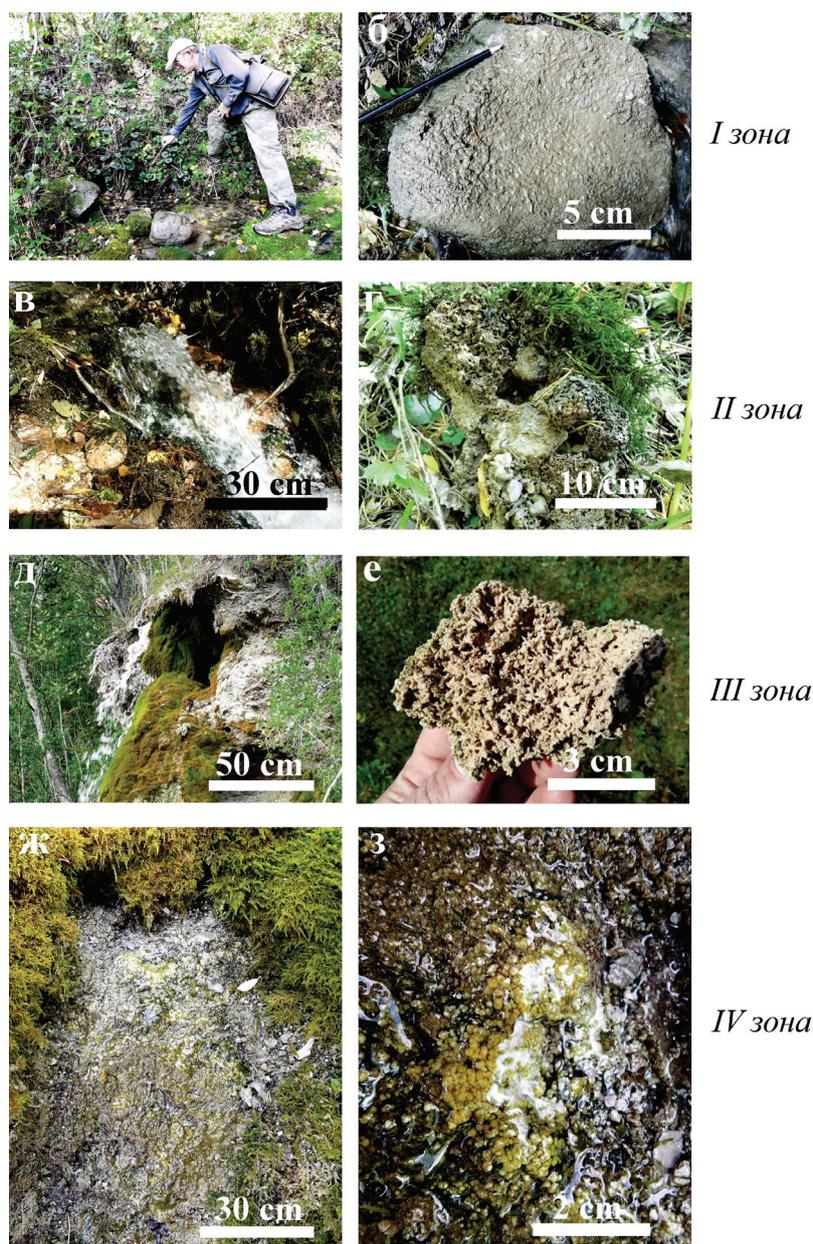


Рис. 3. Зоны травертинового источника Васькин ключ, фото.

а, б – зона I начального осаждения карбоната, исток (а), пленочные образования на поверхности донной подложки струи (б); в, г – зона II образования рыхлых травертинов, ступенька (в), рыхлые травертины в борту ступеньки (г); д, е – зона III интенсивного травертинообразования, д – травертины в точке отрыва воды, футлярообразные агрегаты карбоната по растениям (*Sphagnum*); ж, з – зона IV бестравертиновая, зона бактериальных матов (ж), редкие кальцитовые сферулы (з).

Fig. 3. Zones of travertine-forming Vas'kkin Spring, photos.

а, б – zone I of the beginning of carbonate condensation, source (a), carbonate films on rock bottom of the stream (б); в, г – zone II of porous travertines, profile step (в), porous travertines in the bank of the stream (г); д, е – zone III of intense formation of travertines, д – travertines at the point of spring fall, case-like carbonate aggregates after plant relics (*Sphagnum*); ж, з – zone IV of final carbonate condensation stage, without rock-forming travertines, bacterial mat zone (ж), rare calcite spherules (з).

Четвертая зона – зона затухающего осаждения карбонатов – расположена у подножья массивных травертинов, где развиты бактериальные маты, простирающиеся на 2–2.5 м вниз по тече-

нию вплоть до уреза воды в русле р. Сухона (см. рис. 3ж). В переходной зоне встречены округлые карбонатные образования диаметром около 2 мм, которые, по всей видимости, являются конечным

Таблица 1

**Результаты неполного карбонатного анализа травертинов  
и вмещающих пород**

Table 1

**Results of partial carbonate analysis of travertines and their host rocks**

| Номер образца | Зона   | Содержание, мас. %   |       |       |                                     |                               |                 |       |                    |       |                   |                                     |                       |
|---------------|--|----------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------|--------------------|-------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------|
|               |  | Определяемый элемент |       |       |                                     |                               |                 |       |                    |       | Карбонатные фазы  |                                     | Нерастворимый остаток |
|               |  | CaO                  | MgO   | MnO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ. | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | CO <sub>2</sub> | FeO   | Нераствор. остаток | Сумма | CaCO <sub>3</sub> | CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> |                       |
| ВК 1/2-1      | Исток (I зона)                                     | 28.69                | 19.56 | 0.05  | 0.22                                | 0.05                          | 43.43           | <0.25 | 4.80               | 96.80 | 1.75              | 93.24                               | 5.00                  |
| ВК 1/1-5      | Умеренного травертинообразования (II зона)         | 50.59                | 1.19  | 0.02  | 0.12                                | 0.13                          | 39.58           | <0.25 | 4.17               | 95.80 | 89.74             | 5.81                                | 4.45                  |
| ВК 1/1-6      |  | 47.33                | 0.68  | <0.01 | 0.16                                | 0.10                          | 37.20           | <0.25 | 9.75               | 95.22 | 86.33             | 3.30                                | 10.36                 |
| ВК 1/1-7      |  | 30.00                | 15.52 | 0.08  | 0.85                                | 0.08                          | 38.96           | 0.46  | 7.46               | 92.95 | 15.28             | 76.66                               | 8.06                  |
| ВК 1/1-8      |  | 39.26                | 0.93  | 0.02  | 0.13                                | 0.11                          | 31.24           | <0.25 | 22.84              | 94.53 | 71.03             | 4.55                                | 24.42                 |
| ВК 1/1-9      | Вмещающие породы у желоба водопада (III зона)      | 23.54                | 13.05 | 0.05  | 0.91                                | 0.07                          | 30.15           | 0.30  | 23.22              | 90.99 | 4.38              | 68.84                               | 26.78                 |
| ВК 1/1-10     |  | 24.94                | 18.24 | 0.06  | 0.43                                | 0.04                          | 38.52           | <0.25 | 12.73              | 94.96 | —                 | 86.38                               | 13.62                 |
| ВК 1/1-11     | Зона интенсивного травертинообразования (III зона) | 47.58                | 1.02  | 0.01  | <0.05                               | 0.12                          | 37.77           | <0.25 | 10.91              | 97.41 | 83.85             | 4.84                                | 11.32                 |
| ВК 1/1-13     |  | 47.48                | 1.19  | <0.01 | 0.05                                | 0.12                          | 38.00           | <0.25 | 9.93               | 96.77 | 83.97             | 5.68                                | 10.36                 |
| ВК 1/1-13a    |  | 40.45                | 1.59  | 0.05  | 0.70                                | 0.14                          | 32.99           | 0.63  | 18.94              | 94.86 | 71.92             | 7.79                                | 20.29                 |
| ВК 1/1-14     |  | 42.78                | 0.85  | 0.01  | 0.59                                | 0.10                          | 34.05           | <0.25 | 19.26              | 97.64 | 76.27             | 3.98                                | 19.75                 |

*Примечание.* Данные пересчета на нормативные фазы.

*Note.* Data are recalculated to phase mineral components.

продуктом осаждения карбонатов из вод ключа. Непосредственно в этой части профиля карбонаты массово не отлагаются (см. рис. 3з), и эта зона насыщена гидроокислами железа.

**Вещественный состав травертинов.** Данные карбонатного анализа травертинов (табл. 1) позволяют отметить некоторые особенности изменения их минерального и химического состава. По данным карбонатного анализа содержания CaCO<sub>3</sub> уменьшаются по мере удаления от истока, в то время, как содержание магниальной компоненты увеличивается. Вмещающие породы практически полностью состоят из CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Незначительное присутствие CaCO<sub>3</sub> объясняется заполнением им трещин во вмещающих доломитах, которое наблюдается невооруженным глазом непосредственно в стенке обнажения и в сколах штуфных образцов. Согласно данным рамановской спектроскопии (рис. 4) фазовый минеральный состав карбонатов травертинов представлен кальцитом и доломитом.

**Изотопный состав карбонатов.** Величины δ<sup>13</sup>C и δ<sup>18</sup>O в кальците травертинов источника Васькин ключ варьируют от -9.3 до -10.6 ‰ и от +19.6 до +20.1 ‰, соответственно (табл. 2). Таким образом, травертины источника по величине δ<sup>13</sup>C оказываются значительно легче карбонатов морского происхождения (δ<sup>13</sup>C -0.13 ‰; Галимов, 1968), и карбонатов горячих травертиновых источников

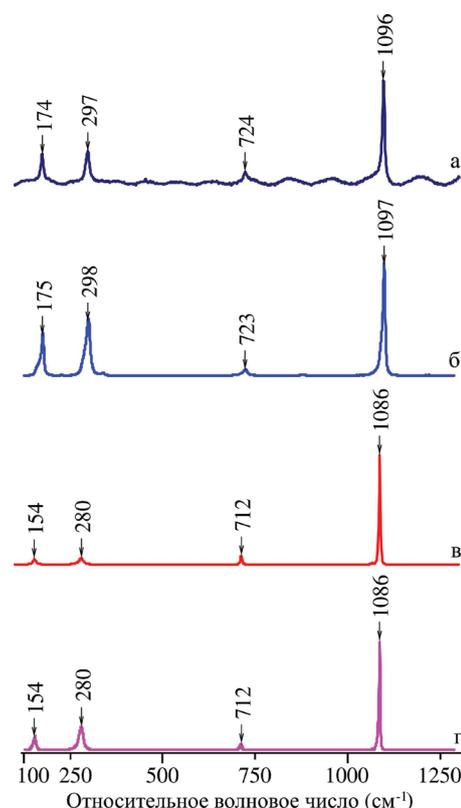


Рис. 4. Рамановские спектры доломита (а, б) из травертина (а) и из базы данных RRUFF (б) и кальцита (в, г) из травертина (в) и из базы данных RRUFF (г).

Fig. 4. Raman spectra of dolomite (а, б) of travertine (а) and RRUFF database (б) and calcite (в, г) of travertine (в) and RRUFF database (г).

Таблица 2

## Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов

Table 2

## Isotopic composition of carbon and oxygen of carbonates

| Номер образца | Зона   | Минеральный состав карбонатного осадка | Расстояние от истока, м | $\delta^{13}\text{C}$ , ‰ PDB | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ SMOW |
|---------------|--|--|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| ВК 1/2-1      | Исток ручья (I зона)                               | Доломит                                | 0                       | 0.40                          | 32.4                           |
| ВК 1/1-5      | Умеренного травертинообразования (II зона)         | Кальцит                                | 36                      | -9.30                         | 20.1                           |
| ВК 1/1-6      |  | Доломит                                | 38                      | -9.80                         | 20.0                           |
| ВК 1/1-7      |  | Кальцит                                | 41                      | -0.70                         | 28.7                           |
| ВК 1/1-8      |  | Кальцит                                | 42                      | -10.2                         | 19.6                           |
| ВК 1/1-9      | Вмещающие породы у желоба водопада (III зона)      | Доломит                                | 44                      | 0.50                          | 28.9                           |
| ВК 1/1-10     |  | Доломит                                | 45                      | 2.50                          | 31.2                           |
| ВК 1/1-11     | Зона интенсивного травертинообразования (III зона) | Кальцит                                | 46                      | -10.6                         | 19.9                           |
| ВК 1/1-13     |  | Кальцит                                | 47                      | -10.1                         | 20.0                           |
| ВК 1/1-14     |  | Кальцит                                | 48                      | -10.1                         | 19.9                           |

Большого Кавказа ( $\delta^{13}\text{C} +5.8$  ‰; Лаврушин и др., 2006). По простиранию профиля травертинообразования наблюдается незначительное облегчение изотопного состава  $\delta^{13}\text{C}$  карбонатов, тогда как значения  $\delta^{18}\text{O}$  практически не изменяются. Изотопный состав углерода и кислорода доломитов источника более тяжелый в тех же зонах травертинообразования (см. табл. 2).

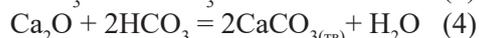
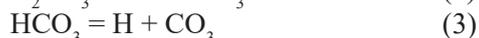
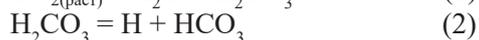
## Обсуждение

Согласно проведенным ранее исследованиям вода источника холодная слабоминерализованная нейтрально-слабощелочная, имеет гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав, ее температура даже в летние месяцы по (Юшкин, 1994) составляет всего  $+8 - +12$  °С, дебит не превышает 1000 л/мин. По данным (Митюшева, 2013) температура воды в августе 2008 г. составляла  $+4.3$  °С у истока, но по ходу течения повышалась и в конце профиля достигала  $+6.3$  °С. По мере удаления от истока в воде существенно уменьшается содержание  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ , уменьшаются значения  $Eh$  от  $+181$  до  $+136$  мВ и увеличивается  $pH$  от 7.3 до 8.22, что указывает на усиление окислительной обстановки по мере продвижения водотока (Митюшева, 2013). Выпадение карбонатов холодного источника Васькин ключ по уровню окислительной обстановки соответствует предложенному ранее критерию (Лепокурова, 2005), но происходит при существенно меньшей концентрации (Митюшева, 2013), почти на 150 мг/л меньше, чем это было установлено для других холодных источников (Лепокурова, 2005).

Известно, что обогащение карбонатов изотопом  $^{13}\text{C}$  происходит вследствие термодинамическо-

го изотопного эффекта в системе  $\text{CO}_2\text{-HCO}_3^-\text{-CO}_3$ . В естественных условиях изотопный состав карбонатов определяется солевым составом воды (степенью перенасыщения вод карбонатом кальция), окислительно-восстановительным и щелочно-кислотным режимами вод ручья, а также факторами, контролирующими скорость изотопного обмена (глубина, температура, интенсивность циркуляции воды и газообмена ее с атмосферой) и, наконец, изотопным составом исходной  $\text{CO}_2$  (Галимов, 1968).

Воды источника Васькин ключ характеризуются относительно низкими температурами, интенсивным обменом  $\text{CO}_2$  между воздухом и водой и интенсивным перемешиванием их с поверхностными водами. Исходя из значения средней величины  $\delta^{13}\text{C}$  атмосферного  $\text{CO}_2$  лесного воздуха, равной  $-9.8$  ‰ (Галимов, 1968), следует, что изотопный состав вод источника контролируется изотопным обменом  $\text{CO}_2$  атмосферы и  $\text{CO}_2$  воды в результате реакции  $\text{C}^{13}\text{O}_{2(\text{газ})} + \text{C}^{12}\text{O}_{2(\text{раств})} = \text{C}^{12}\text{O}_{2(\text{газ})} + \text{C}^{13}\text{O}_{2(\text{раств})}$ , происходящей при течении воды и смачивании ей образованных травертинов и материала субстрата. Влияние атмосферного  $\text{CO}_2$  на карбонаты травертинов может происходить путем серии следующих химических реакций:



Преобладание легких изотопов углерода в составе карбонатов травертинов связано с преимущественно поверхностным источником вод источника, которые активно вступают в изотопный обмен в системе углекислый газ воздуха–углекислый газ

воды. При этом уменьшение содержания изотопов  $\delta^{13}\text{C}$  по профилю связано с процессом изотопного фракционирования  $\delta^{13}\text{C}$  в системе «вода-кальцит», протекающим при дегазации насыщенной  $\text{CO}_2$  минеральной воды.

Относительно стабильные величины  $\delta^{18}\text{O}$  в карбонатах травертинов связаны с тем, что изотопный состав кислорода в травертинах контролируется водой. Содержание легкого кислорода в воде намного превосходит объем  $\delta^{18}\text{O}$ , удаляемого из раствора с кальцитом и углекислым газом. Соответственно, величины  $\delta^{18}\text{O}$  зависят в первую очередь, от изотопного состава вод источника и от температурных условий осаждения карбонатов (Лаврушин и др., 2006).

По источнику вод различают травертины, образованные за счет глубинных или приповерхностных/метеорных вод (Лаврушин, 2006; Pentecost, Viles, 1994). Согласно изотопным исследованиям и геологическому строению района воды источника Васькин ключ имеют метеорное происхождение. На Васькинском ключе температура воды на протяжении профиля меняется от  $+4.3\text{ }^\circ\text{C}$  до  $+8.0\text{ }^\circ\text{C}$ , соответственно от истока до устья ручья ввиду повышения температуры воды растворимость  $\text{CO}_2$  уменьшается и увеличивается скорость образования карбонатного осадка, приводящая к относительно интенсивному травертинообразованию в III зоне. Исходя из проведенных исследований, травертинообразование на источнике Васькин ключ наиболее предпочтительно в летнее время.

Выделенные по геолого-морфологическим признакам четыре зоны отличаются особенностями структурно-вещественного состава травертинов. Зональность источника Васькин ключ в соответствии с типизацией травертиновых источников (Pentecost, Viles, 1994), несмотря на небольшую протяженность потока, типична для линейных объектов. Согласно (Pentecost, Viles, 1994) травертины исследованного источника относятся к метеорным автохтонным отложениям линейного типа с каскадным профилем.

Спецификой объекта при выпадении карбоната является структурообразующая роль органических подложек, представляющих собой отчасти законсервированную, частично разложившуюся органику, либо создающую при вымывании водой причудливые футлярообразные агрегаты карбонатов, со временем заполняющиеся карбонатным осадком и образующие плотные травертины. Как отмечалось в работе (Pentecost, Viles, 1994) рас-

тения, вероятно, играют важную роль в образовании травертинов, однако их участие исследовано недостаточно. Таким образом, нельзя исключить и существенную биологическую роль в процессе травертинообразования, которое может приводить к заметному облегчению изотопии карбонатов (Лепокурова, 2005), что и наблюдается в исследованных травертинах. Несмотря на ряд специализированных работ (Tatarinov et al., 2006), влияние биологического фактора в травертинообразовании остается неясным, особенно в условиях холодных источников.

### Заключение

Впервые установлено, что осаждение карбонатов на источнике Васькин ключ происходит на всем протяжении потока: непосредственно от самого его истока до устья в р. Сухона. Выделены четыре типичные зоны травертинообразования для объектов линейного типа и определена принадлежность травертинов к метеорным автохтонным отложениям линейного типа с каскадным профилем.

Установлен неоднородный состав травертинов, как по фазовому минеральному составу, так и по изотопии углерода и кислорода карбонатов от истока вдоль профиля ручья вплоть до его разгрузки в р. Сухона. Соотношение кальцита и доломита, как правило, смещается в сторону первого, при этом максимальное содержание доломита характерно зоне, непосредственно приуроченной к самому истоку. Доломит травертинов характеризуется существенно более тяжелым изотопным составом карбонатного углерода и кислорода по сравнению с кальцитом.

Источник Васькин ключ может рассматриваться как эталонный объект холодного травертинообразования без какой-либо примеси глубинной компоненты. Весьма существенным является факт изотопного фракционирования по углероду и кислороду между кальцитом и доломитом. Учитывая это обстоятельство, в дальнейшем необходимо учитывать возможность образования части карбонатов в виде доломита и соответствующего изотопного фракционирования, которое нужно обязательно принимать во внимание при гидрогеологических реконструкциях, включая современные и палеообстановки. Травертины источника Васькин ключ также являются уникальным объектом для изучения механизма участия растений в процессе холодного травертинообразования.

Авторы выражают благодарность И.В. Смолевой, О.В. Кокшаровой, Ю.В. Симаковой за выполнение аналитических работ, Т.П. Митюшевой и П.П. Юханову за участие в экспедиционных работах. Исследования выполнены при финансовой поддержке НИР ГР № АААА-А17-117121270036-7.

### Литература

- Буслович А.Л., Авдошенко Н.Д., Гаркуша И.В.** (2001) История геологического изучения Вологодской области. В сб.: *Геология и минеральные ресурсы Вологодской области*. Вологда, Русь, 190 с.
- Бычков Ю.А., Киквадзе О.Е., Лаврушин В.Ю., Кулешов В.Н.** (2007) Физико-химическая модель формирования изотопного состава карбонатных травертинов источника Тохана (Приэльбрусье, Северный Кавказ). *Геохимия*, (3), 1–12.
- Галимов Э.М.** (1968) Геохимия стабильных изотопов углерода. Москва, Недра. 226 с.
- Гидрогеология СССР. (1969) Том XLIV. Архангельская область, Вологодская область. Москва, Недра. 300 с.
- Лаврушин В.Ю., Кулешов И.В., Киквадзе О.Е.** (2006) Травертины Северного Кавказа. *Литоология и полезные ископаемые*, (2), 1–30.
- Лепокурова О.В.** (2005) Геохимия подземных вод Севера Алтае-Саянского горного обрамления, формирующих травертины. Автореф. канд. дис. Томск. 21 с.
- Митюшева Т.П.** (2013) Гидрохимическое моделирование карбонатообразования на источнике «Васькин ключ» (р. Сухона). *Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения)*. Сыктывкар, ИГ Коми НЦ УрО РАН, 466–469.
- Плоскова С.И.** (2005) Вниз по Сухоне-реке. *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (9), 28–29.
- Плоскова С.И.** (2007) Полевое знакомство с геопамятниками Великоустюгского района Вологодской области. *Изучение, сохранение и использование объектов геологического наследия Северных регионов (Республика Коми)*. Сыктывкар, 160 с.
- Постановление о модернизации верхнего отдела пермской системы общей (Восточно-Европейской) стратиграфической шкалы (2005) Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. СПб, ВСЕГЕИ, вып. 36, 14–16.
- Семенов Г.А.** (2011) Травертины альпийского типа пояса мира и основные направления их использования. *Ученые Записки Казанского университета. Серия естественные науки*, 53(4), 267–278.
- Склярёв Е.В., Федоровский В.С., Склярёва О.А., Сквитина Т.М., Данилова Ю.В., Орлова Л.А., Ухова Н.Н.** (2007) Гидротермальная активность в Байкальской рифтовой зоне: горячие источники и продукты отложения палеотерм. *Доклады академии наук*, 412(2), 257–261.
- Шумилова Т.Г., Данилова Ю.В.** (2009) Новый генетический тип графита в связи с травертинами. *Доклады академии наук*, 428(2), 249–251.
- Юшкин Н.П.** (1994) «Окаменелый мох» травертинового источника на реке Сухоне. *Литоогенез и геохимия осадочных формаций Тимано-Уральского региона*, вып. 84, 96–104.
- Altunel E., Hancock P. L.** (1993) Morphology and structural setting of Quaternary travertines at Pamukkale, Turkey. *Geological Journal*, 28(3–4), 335–346.
- Crossey L.J., Karlstrom K.E., Springer A.E., Newell D., Hilton D.R., Fischer T.** (2009) Degassing of mantle-derived CO<sub>2</sub> and He from springs in the southern Colorado Plateau region – Neotectonic connections and implications for groundwater systems. *GSA Bulletin*, 121(7/8), 1034–1053.
- Dilsiz C., Marques J.M.M., Carreira P.M.M.** (2004) The impact of hydrological changes on travertine deposits related to thermal springs in the Pamukkale area (SW Turkey). *Environmental Geology*, 45, 808–817.
- Gibert R.O., Taberner C., Sáez A., Giralt S., Alonso R.N., Edwards R.L., Pueyo J.J.** (2009) Igneous origin of CO<sub>2</sub> in ancient and recent hot-spring waters and travertines from the Northern Argentinean Andes. *Journal of Sedimentary Research*, 79(8), 554–567.
- Lund J., Freeston D.H., Boyd T.L.** (2005) World-wide direct uses of geothermal energy 2005. *Proceedings of World Geothermal Congress*. Antalya, 20 p.
- Minissale A., Kerrick D.M., Magro G., Murrell M.T., Paladini M., Rihs S., Sturchio N.C., Tassi F., Vaselli O.** (2002) Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy): structural, hydrologic and paleoclimatic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 709–728.
- Omelson C.R., Pollard W.H., Andersen D.T.** (2006) A geochemical evaluation of perennial spring activity and associated mineral precipitates at Expedition Fjord, Axel Heiberg Island, Canadian High Arctic. *Applied Geochemistry*, 21, 1–15.
- Pentecost A.** (1995) Geochemistry of carbon dioxide in six travertine-depositing waters of Italy. *Journal of Hydrology*, 167, 263–278.
- Pentecost A., Viles H.** (1994) A review and reassessment of travertine classification. *Géographie physique et Quaternaire*, 48(3), 305–314.
- Tatarinov A.V., Yalovik L.I., Danilova E.V., Namsaraev Z.B.** (2006) Participation of microorganisms in the formation of travertines and sapropelite kerogen in sediments of thermal carbonic waters in the Baikal rift zone. *Doklady Earth Sciences*, 411, 1435–1438.

## References

- Altunel E., Hancock P. L.** (1993) Morphology and structural setting of Quaternary travertines at Pamukkale, Turkey. *Geological Journal*, **28**(3–4), 335–346.
- Buslovich A.L., Avdoshenko N.D., Garkusha I.V.** (2001) History of geological study of Vologda district / [Geology and mineral resources of Vologda district]. Vologda, Rus, 190 p. (in Russian)
- Bychkov A.Yu., Kikvadze O.E., Lavrushin V.Yu., Kuleshov V.N.** (2007) Physicochemical model for the generation of the isotopic composition of the carbonate travertine produced by the Tokhana spring, mount Elbrus area, northern Caucasus. *Geochemistry International*, (3), 235–246.
- Crossey L.J., Karlstrom K.E., Springer A.E., Newell D., Hilton D.R., Fischer T.** (2009) Degassing of mantle-derived CO<sub>2</sub> and He from springs in the southern Colorado Plateau region – Neotectonic connections and implications for groundwater systems. *GSA Bulletin*, **121**(7/8), 1034–1053.
- Dilsiz C., Marques J.M.M., Carreira P.M.M.** (2004) The impact of hydrological changes on travertine deposits related to thermal springs in the Pamukkale area (SW Turkey). *Environmental Geology*, **45**, 808–817.
- Galimov E.M.** (1968) [Geochemistry of stable C isotopes]. Moscow, Nedra, 226 p. (in Russian)
- Gibert R.O., Taberner C., Sáez A., Giral S., Alonso R.N., Edwards R.L., Pueyo J.J.** (2009) Igneous origin of CO<sub>2</sub> in ancient and recent hot-spring waters and travertines from the Northern Argentinean Andes. *Journal of Sedimentary Research*, **79**(8), 554–567.
- [Hydrogeology of the USSR]. Volume XLIV. Arkhangelsk district. Vologda district. Moscow, Nedra, 300 p. (in Russian)
- Lavrushin V.Yu., Kuleshov V.N., Kikvadze O.E.** (2006) Travertines of the northern Caucasus. *Lithology and Mineral Resources*, (2), 137–164.
- Lepokurova O.V.** (2005) [Geochemistry of underground waters of the north if Altay–Sayany mountains forming travertines]. *Thesis of Dissertation of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences*. Tomsk, 21 p. (in Russian)
- Lund J., Freeston D.H., Boyd T.L.** (2005) World-wide direct uses of geothermal energy 2005. *Proceedings of World Geothermal Congress*. Antalya, 20 p.
- Minissale A., Kerrick D.M., Magro G., Murrell M.T., Paladini M., Rihs S., Sturchio N.C., Tassi F., Vaselli O.** (2002) Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy): structural, hydrologic and paleoclimatic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, **203**, 709–728.
- Mityusheva T.P.** (2013) [Hydrochemical modeling of carbonate formation of the Vas'kin klyuch spring (Sukhona River)]. *Sovremennye problemy teoreticheskoi, eksperimentalnoi i prikladnoi mineralogii (Yushkinskie chteniya)* [Current problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin's Readings)]. Syktyvkar, IG Komi SC UB RAS, 466–469. (in Russian)
- Omelson C.R., Pollard W.H., Andersen D.T.** (2006) A geochemical evaluation of perennial spring activity and associated mineral precipitates at Expedition Fjord, Axel Heiberg Island, Canadian High Arctic. *Applied Geochemistry*, **21**, 1–15.
- Pentecost A.** (1995) Geochemistry of carbon dioxide in six travertine-depositing waters of Italy. *Journal of Hydrology*, **167**, 263–278.
- Pentecost A., Viles H.** (1994) A review and reassessment of travertine classification. *Géographie physique et Quaternaire*, **48**(3), 305–314.
- Ploskova S.I.** (2005) [Downstream the Sukhona River]. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, (9), 28–29 (in Russian)
- Ploskova S.I.** (2007) [Field acquaintance with geomonuments of the Veliky Ustyug region of Vologda district]. *Izuchenie, sokhranenie i ispol'zovanie geologicheskogo naslediya Severnykh regionov (Respublika Komi) [Study, preservation and use of objects of geological heritage of Northern regions (Komi Republic)]*. Syktyvkar, 160 p (in Russian)
- Decision on modernization of the upper series of Permian System of general (East European) stratigraphic scale (2006) Decisions of Interdepartmental stratigraphic committee and its constant commissions. SPb, VSEGEI, is. 36, 14–16 (in Russian)
- Semenov G.A.** (2011) [Travertines of Alpine world belt and major directions of their use]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya estestvennyye nauki [Science proceedings of Kazan University. Series Natural Sciences]*, **53**(4), 267–278. (in Russian)
- Sklyarov E.V., Fedorovskii V.S., Sklyarova O.A., Skovitina T.M., Danilova Yu.V., Orlova L.A., Ukhovala N.N.** (2007) Hydrothermal activity in the Baikal rift zone: Recent hot springs and deposits of paleothermal waters. *Doklady Earth Sciences*, **412**(1) 101–105.
- Shumilova T.G., Danilova Yu.V.** (2009) New genetic type of graphite in connection with travertines. *Doklady Earth Sciences*, **428**, 1171–1174.
- Tatarinov A.V., Yalovik L.I., Danilova E.V., Namsaraev Z.B.** (2006) Participation of microorganisms in the formation of travertines and sapropelite kerogen in sediments of thermal carbonic waters in the Baikal rift zone. *Doklady Earth Sciences*, **411**, 1435–1438.
- Yushkin N.P.** (1994) [«Stony moss» of travertine spring of the Sukhona River]. *Litogenes i geokhimiya osadochnykh formatsii Timano-Ural'skogo regiona [Lithogenesis and geochemistry of sedimentary rocks of Timan-Uralian region]*, 84, 96–104 (in Russian)

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2018 г.