

## **ФОРМЫ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕРМАЛЬНЫХ ВОДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАНГ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ВЬЕТНАМ)**

*Дмитрий Анатольевич Новиков*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, доцент кафедр геологии месторождений нефти и газа и общей и региональной геологии, e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

*Андрей Евгеньевич Шохин*

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, бакалавр кафедры геологии месторождений нефти и газа, тел. (383)363-80-36, e-mail: ShokhinAE@ipgg.sbras.ru

Впервые приводятся результаты расчетов форм миграции химических элементов в термальных водах месторождения Банг (Центральный Вьетнам). Изученные воды по температуре разделяются на две группы: 24.3–34.5 °С для первой и 62.1–97.1 °С для второй. Первый тип относится к водам  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$  состава, имеет крайне низкую минерализацию (44–87 мг/дм<sup>3</sup>) и характеризуется величиной рН от слабокислых до слабощелочных (5.71–7.84). Второй тип относится к водам  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  состава с величиной общей минерализации до 256–659 мг/дм<sup>3</sup> и рН от 8.03 до 8.51. Расчеты форм миграции химических элементов показали существенные различия в их поведении для двух выявленных групп. Так, в водах с температурой 24.3–34.5 °С доминирует форма миграции в виде свободных ионов. Для термальных вод с температурой 62.1–97.1 °С характерна миграция элементов в соединениях с карбонатами и серой, а также в виде свободных ионов.

**Ключевые слова:** термальные воды, гидрогеохимия, формы миграции химических элементов, генезис, месторождение Банг, Центральный Вьетнам.

## **FORMS OF THE MIGRATION OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE THERMAL WATERS OF THE BANG DEPOSIT (CENTRAL VIETNAM)**

*Dmitry A. Novikov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Head of the Laboratory of Sedimentary Basins Hydrogeology of Siberia; Novosibirsk State University, 1, Pirogov St., Novosibirsk, 630090, Russia, Associate Professor of the general and Regional Geology and Geology of Petroleum Fields Departments, e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

*Andrey E. Shokhin*

Novosibirsk State University, 1, Pirogov St., Novosibirsk, 630090, Russia, BSc of Geological and Geophysical Department, e-mail: ShokhinAE@ipgg.sbras.ru

Calculation results for the forms in which chemical elements migrate in the thermal waters of the Bang deposit (Central Vietnam) are reported for the first time. The studied waters are divided into two groups with respect to temperature: 24.3–34.5 °C for the first group and 62.1–97.1 °C for the second group. The first type relates to the waters of HCO<sub>3</sub>-Cl-Na-Mg composition, has very low mineralization (44–87 mg/dm<sup>3</sup>) and is characterized by pH from weakly acidic to weakly alkaline (5.71–7.84). The second type relates to the waters of HCO<sub>3</sub>-Na composition with total mineralization up to 256–659 mg/dm<sup>3</sup> and pH from 8.03 to 8.51. Calculations of the forms of migration of chemical elements showed substantial differences in their behavior for two revealed groups. For example, in waters with the temperature of 24.3–34.5 °C, the dominating form is migration of free ions. For thermal waters with the temperature of 62.1–97.1 °C, migration of the elements in compounds with carbonates and sulfur is characteristic, as well as in the form of free ions.

**Key words:** thermal waters, hydrogeochemistry, forms of migration of chemical elements, genesis, Bang deposit, Central Vietnam.

Выявление миграционных форм элементов необходимо для решения широкого круга гидрогеохимических задач [1]. Разные соединения одного и того же элемента имеют свои термодинамические и физико-химические параметры. В этой связи процессы миграции элементов и их распределение при взаимодействии воды с породами невозможно правильно интерпретировать и прогнозировать, не зная форм их нахождения в природных водах с различным химическим составом.

Термальные воды Вьетнама изучаются на протяжении нескольких десятилетий, выполнены многочисленные исследования, направленные на выявление тектонического режима, геологического и гидрогеологического строения, гидрогеохимии и т.д. основных геотермальных областей [2–12]. При этом остаются нерешенными многие вопросы формирования их химического и изотопного состава. Решение этой проблемы невозможно без детального изучения состояния термодинамического равновесия гидротерм с ведущими минералами вмещающих пород. В предыдущих работах [2–3, 6] мы подробно рассмотрели гидрогеохимию и изотопный состав термальных вод центрального Вьетнама и гидротерм месторождения Банг в частности [4–5]. Поэтому основной целью данной работы является выявление основных особенностей равновесия в системе термы – горная порода.

Месторождение термальных вод Банг приурочено к зоне тектонических нарушений, связанной с пересечением крупных разломов Кьень Жань и Банг (рис. 1). Первый имеет простирание с севера на юг и трассируется одноименной рекой, а второй с северо-запада на юго-восток. Наблюдается разгрузка гидротерм и интенсивная фумарольная деятельность. Суммарный дебит высокотермальных вод с температурой 75–97 °C составляет более 40 л/с. На выходе источников отлагаются травертины (диаметр новообразований составляет до 1,0–1,5 м).

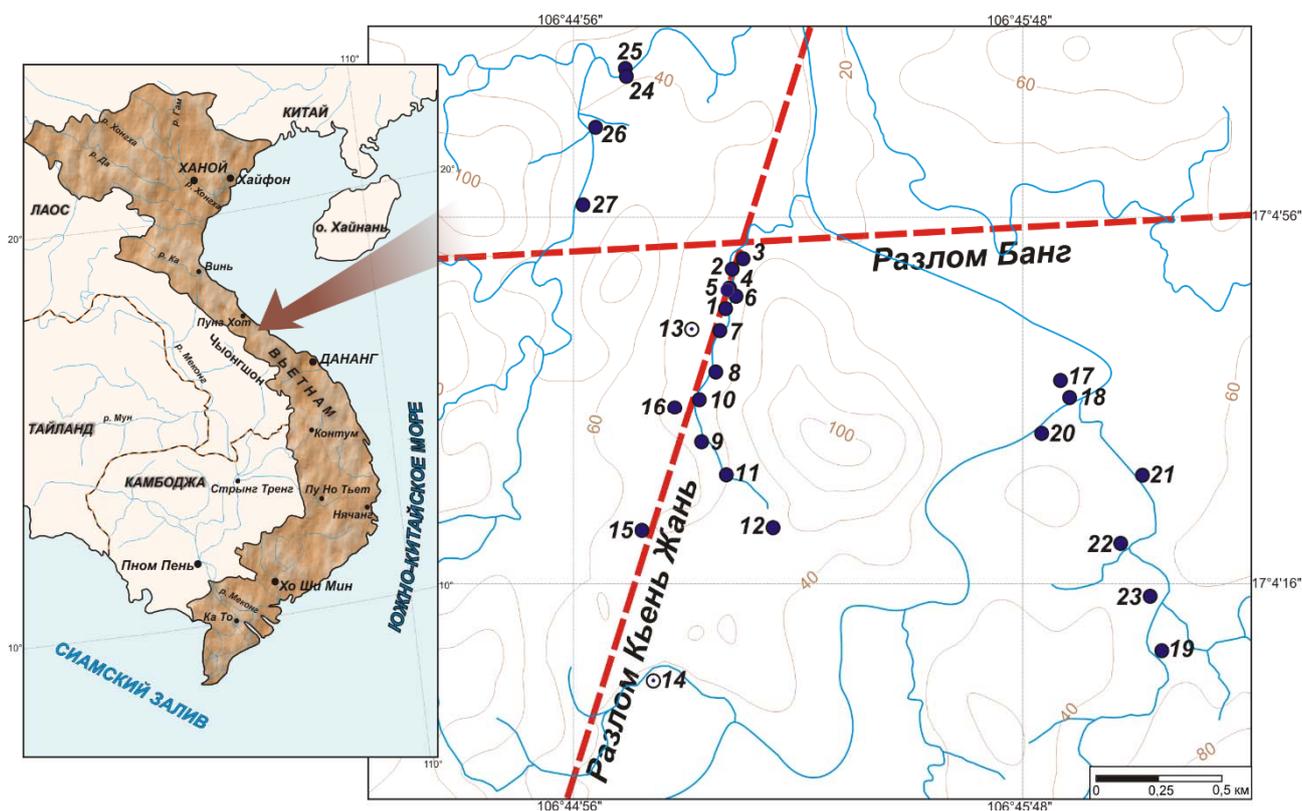


Рис. 1. Местоположение района исследований и схема проявлений термальных вод месторождения Банг

На месторождении Банг развиты термальные воды с величиной общей минерализации от 44 до 659 мг/дм<sup>3</sup> преимущественно гидрокарбонатного натриевого, гидрокарбонатно-хлоридного натриево-магниевого состава (по С.А. Щукареву). Изученные воды значительно отличаются по своему составу и содержанию основных макро- и микрокомпонентов в зависимости от температуры источника. Установлены две гидрогеохимические группы вод. Первая характеризуется температурой на выходе источника 24,3-34,5 °С, гидрокарбонатно-хлоридным натриево-магниевым составом с величиной общей минерализации 44-87 мг/дм<sup>3</sup>. Вторая соответствует интервалу температур 62,1-97,1 °С с гидрокарбонатным натриевым составом и величиной минерализации 255-659 мг/дм<sup>3</sup>. Изученные термальные воды отличаются соленостью, не превышающей 1 г/дм<sup>3</sup>, что может быть связано с тем, что их состав формируется в пределах нестратифицируемых подразделений гидрогеологических массивов в области широкого развития интрузивных пород, устойчивых к процессам выветривания. Циркуляция вод происходит по водоносным зонам экзогенной трещиноватости и тектоническим разломам.

Анализ распределения положения точек гидротерм разного химического состава от величины  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  свидетельствует о двух возможных генетических типах вод. В основе водной компоненты первого лежит метеорная вода и в незначительной степени морская (талассогенная), а у группы содовых вод

с максимальными значениями  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ , связанными с фумаролами, более глубинный источник [4-5]. Данные по тритию ( $^3\text{H}$ ) также указывают на разное время циркуляции этих вод. В первом это время не превышает 50 лет ( $^3\text{H} = 4,3\text{-}11,1 \text{ TE}$ ), тогда как во втором может достигать более 1000 лет ( $^3\text{H} = 0,5 \text{ TE}$ ).

Детальные расчеты с помощью программных комплексов Visual Minteq и HG-32 позволили выявить основные формы химических элементов, которые зависят не только от свойств самого элемента (катионы, элементы гидролизаты или анионы), но и от внешних факторов миграции (pH, Eh среды, активных концентраций ионов комплексообразователей). Установленные выше особенности гидрогеохимии и температурного режима двух групп вод гидротерм нашли закономерное отражение в распределении основных форм миграции химических элементов в них.

Рассмотрим формы миграции некоторых химических элементов. Среди макрокомпонентов: Ca, Na, Mg, Cl,  $\text{HCO}_3$  и  $\text{SO}_4$ . Для кальция в водах первой группы доминирует миграция в виде свободного иона до 98 %. Для гидротерм второй группы (рис. 2, а) характерна водная миграция в форме свободного иона и нейтрального аква-комплекса  $\text{CaCO}_3(\text{aq})$  более 50 % от общей концентрации. Так, термальным водам соответствует рост форм миграции натрия в соединениях с карбонатом  $\text{NaCO}_3^-$  и  $\text{NaHCO}_3(\text{aq})$  до 15 % от общей концентрации. В первой группе вод отмечается доминирование миграции натрия в форме свободного иона (рис. 2, б). Магний в водах первой группы мигрирует в форме свободного иона до 99 % от общей концентрации. В термальных водах установлена миграция магния в формах:  $\text{MgOH}^+$ ,  $\text{MgHCO}_3^+$  и  $\text{MgCO}_3(\text{aq})$  (рис. 2, в). Миграция хлора в термальных водах происходит в двух формах: свободного иона  $\text{Cl}^-$  и нейтрального аква-комплекса  $\text{NaCl}(\text{aq})$  примерно в равных соотношениях (рис. 2, г). В водах, разгружающихся в речной долине наиболее характерной формой миграции хлора является  $\text{Cl}^-$ , менее распространена форма  $\text{MgCl}^+$ . Для гидрокарбонат-иона в термальных водах месторождения Банг преобладает миграция в виде  $\text{HCO}_3^-$ . В свою очередь, в водах первой группы значительная часть карбонат-иона мигрирует в форме нейтрального аква-комплекса  $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ , в среднем 33% от общей концентрации. Второй по распространенности формой миграции в этих водах является нейтральный аква-комплекс  $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$  (рис. 2, д). Миграция сульфат-иона в водах обеих групп происходит в трёх основных формах:  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{NaSO}_4^-$ ,  $\text{CaSO}_4(\text{aq})$ . Основной формой миграции является  $\text{SO}_4^{-2}$ . Для термальных вод характерно увеличение доли миграции в форме  $\text{NaSO}_4^-$ , для вод первой группы миграция чаще осуществляется форме  $\text{CaSO}_4(\text{aq})$ .

Что касается микрокомпонентов  $\text{NH}_4$ , S,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , то для них так же выявлены особенности в зависимости от типа вод. Аммоний более холодных вод исследуемого района характеризуется миграцией преимущественно в форме  $\text{NH}_4^+$ . В термальных водах второй группы наиболее распространенной (более 70%) формой является нейтральный аква-комплекс  $\text{NH}_3(\text{aq})$  (рис. 3, а). Для

кремния водная миграция осуществляется преимущественно в форме  $H_4SiO_4$ , однако, в термальных водах часть кремния (до 32 %) мигрирует в форме  $H_3SiO_4$  (рис. 3, б). Крайне интересно распределение форм миграции серы в водах исследуемого региона. Для вод, разгружающихся в речной долине, доминируют формы миграции в виде  $HS$  и  $H_2S$ , с преобладанием последнего. В свою очередь, в участках проявления фумарольной деятельности, распределение форм миграции серы крайне разнообразно. В гидротермах миграция происходит как в виде  $HS$  и  $H_2S$ , так и в виде соединений с металлами  $Cd(HS)_2(aq)$ ,  $Pb(HS)_2(aq)$ ,  $ZnS(aq)$  (рис. 3, в). Стоит подробнее рассмотреть некоторые микрокомпоненты, присущие термальным водам (Mn, Cd, As) (рис. 3, г, д). Часто миграция этих элементов происходит в соединениях с серой  $AsS(OH)HS$ ,  $Cd(HS)_2(aq)$ ,  $MnHS^+$ ,  $CdHS^+$ . Присутствует миграция с карбонатами  $CdCO_3(aq)$ ,  $MnCO_3^+$  и в соединениях с кислородом  $H_3AsO_3$ ,  $H_2AsO_3$ ,  $MnOH^+$ . Для марганца одной из характерных форм является  $Mn^{+2}$ . Большинство других микрокомпонентов мигрирует в форме свободных ионов.

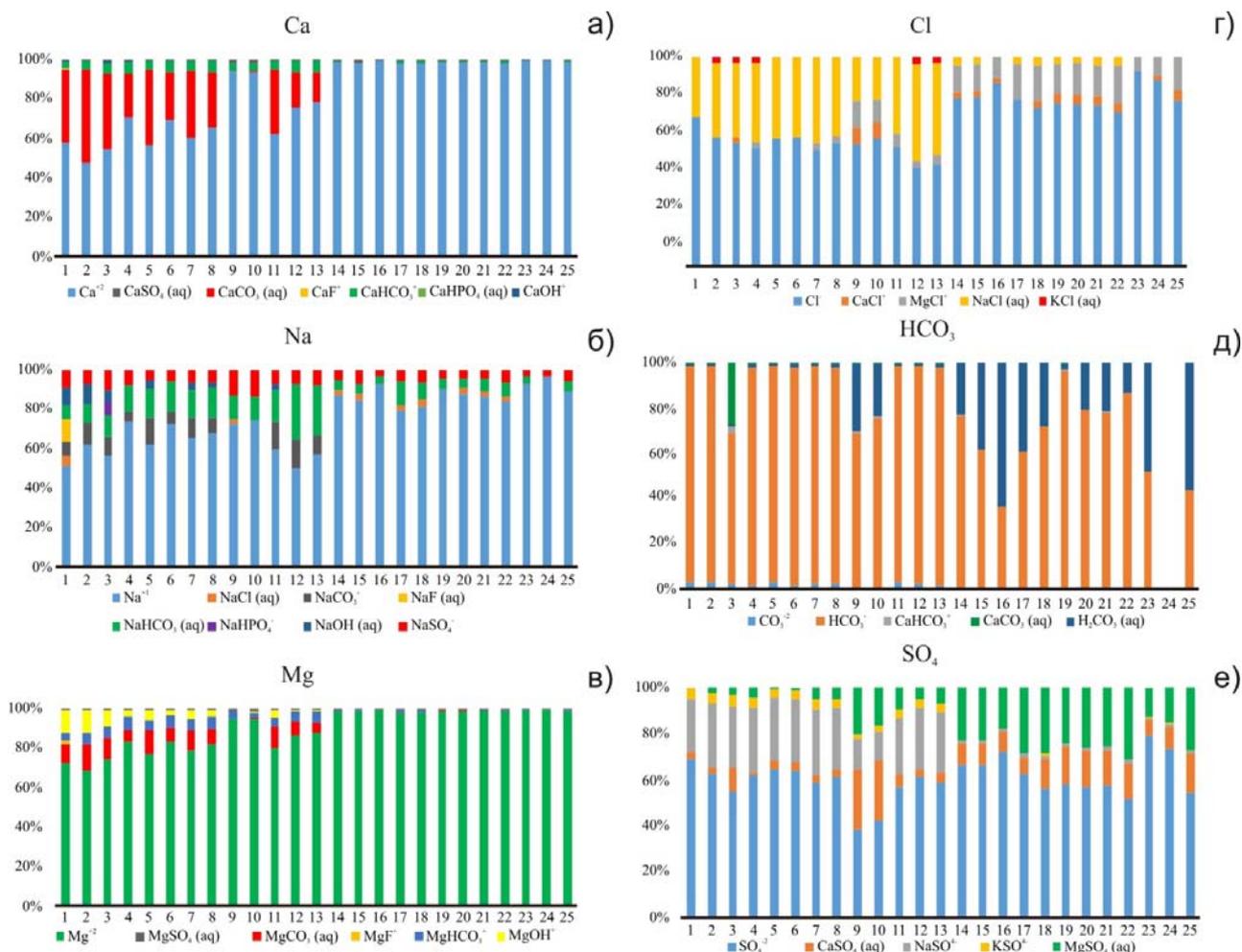


Рис. 2. Соотношение форм миграции основных макрокомпонентов в термальных водах месторождения Банг  
Число соответствует номеру водопункта на рис. 1

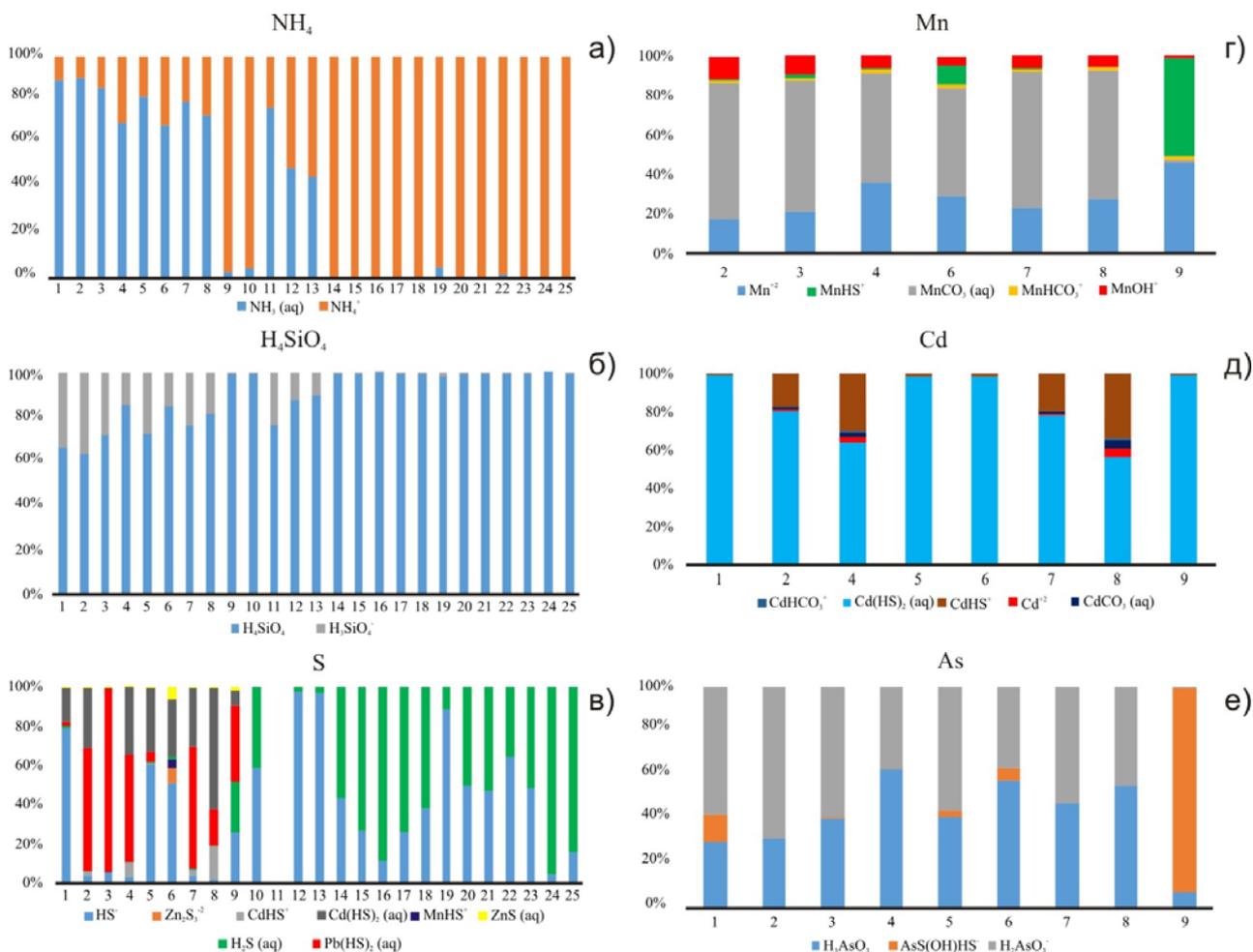


Рис. 3. Основные формы миграции некоторых микрокомпонентов в термальных водах месторождения Банг  
 Число соответствует номеру водопункта на рис. 1

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
2. Новиков Д.А., Доан В.Т. Термальные воды центрального Вьетнама // Сборник материалов XII международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2016», Сб. материалов в 3 т. – Новосибирск: СГУГиТ. – 2016. – Т. 1. – С.94-98.
3. Новиков Д.А., Доан В.Т., Фан Т.К.В., Харитоновна Н.А. Гидрогеохимические особенности термальных вод Южного Трангбо (Центральный Вьетнам) // Тихоокеанская геология. – 2018. – Т. 37. – №1. – С. 77-93.
4. Фан Т. К., Новиков Д. А., Доан В. Т. Гидрогеохимия месторождения термальных вод Банг (провинция Куанг Бинь, Центральный Вьетнам) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 36–40.
5. Роль системы вода-порода в процессах формирования состава термальных вод месторождения Банг (центральный Вьетнам) / Д. А. Новиков, Т. К. Фан, В.Т. Доан, И. И. Юр-

чик, Н. А. Ефимцев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов

в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 2. – С. 55–63.

6. Doan V.T., Phan T.K.V., Tran F.V., Novikov D.A. Features of hydrogeology of Central Vietnam // Материалы II Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». – Владивосток: Дальнаука. – 2015. – С. 234-237.

7. Nghiep V.C. List of mineral and hot water sources in Vietnam. – Vietnam Department of Geology and Mineral Resources. – Hanoi, 1998. – 300 p.

8. Nguyen T.V., Nguyen K.C., Long H., Nguyen D.M., Phan T.T. Preliminary geochemical and isotopic study of the south Trungbo geothermal area in central Vietnam. // In Proceedings of the international conference: Isotope and geochemical techniques applied to geothermal investigations. – IAEA, Vienna, Austria. – 1995. – P. 249-269.

9. Phan C.V. Geology of Cambodia, Laos and Vietnam. Geological survey of Vietnam, 2-nd edition. – Hanoi, 1991. – 158 p.

10. Quy H.H. Overview of the geothermal potential of Vietnam. // Geothermics. – 1998. – V.27. – № 1. – P. 109-115.

11. Tong-Dzuy T., Vu K. Stratigraphic units of Vietnam. – Vietnam National University Publisher, 2nd edition. – Hanoi, 2011. – 554 p.

12. Tran A.V., Doan V.T., Tran T.A., Dinh V.T. The identification of geothermal reservoir from exploration data in Bang hot spring, Central Vietnam// Proceedings, 42nd workshop on geothermal reservoir engineering Stanford University. – Stanford, USA. – 2017. – P.1-8.

© Д. А. Новиков, А. Е. Шохин, 2019