

УДК 553.91 (571.53)

## ЭПИГЕНЕТИЧЕСКАЯ ГРАФИТИЗАЦИЯ В ФУНДАМЕНТЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА — СВИДЕТЕЛЬСТВО МИГРАЦИИ ОБОГАЩЁННЫХ УГЛЕВОДОРОДАМИ ФЛЮИДОВ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ

В. Б. Савельева<sup>1,\*</sup>, Ю. В. Данилова<sup>1</sup>, Т. Г. Шумилова<sup>2</sup>, А. В. Иванов<sup>1</sup>,  
Б. С. Данилов<sup>1</sup>, Е. П. Базарова<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Ф.А. Летниковым 15.03.2017 г.

Поступило 25.03.2017 г.

Впервые выполнены диагностика и структурные исследования углеродного вещества (УВ) кварц-мусковитовых динамосланцев из зон расланцевания в биотитовых мигматитах, пегматитах и диабазах южной части Байкальского выступа Сибирского кратона. Углеродное вещество представлено явно- и микрокристаллическим графитом с остаточными углеводородными радикалами. В сростаниях с УВ обнаружены самородные Ni, Sn, цинкистая медь, соединения Fe–Ni, сульфиды меди, рутил, монацит, циркон. Изотопный состав углерода составляет от –29,19‰ до –31,58‰, за исключением УВ из расланцованного диабаза с  $\delta^{13}\text{C} = -24,93\text{‰}$ .  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование мусковита дало возраст  $1947 \pm 7,8$  млн лет, указывающий на связь динамометаморфизма с аккрецией Аkitканской складчатой системы с древними комплексами кратона. Сделан вывод, что отложение самородных углерода и металлов вызвано миграцией в верхнекоровых образованиях существенно углеводородного флюида.

*Ключевые слова:* Сибирский кратон, Байкальский выступ, углерод, графит, самородные металлы,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524862217-222>

В складчатом обрамлении юга Сибирского кратона и гранитоидах фундамента в пределах нефтегазоносных площадей нередко наблюдаются проявления углеродизации в виде самородного углерода и битумоидов, которые рассматриваются как следы воздействия на породы высокоуглеродистых восстановленных флюидов ([2, 3, 5, 13] и др.). Изотопный состав углерода в графите из приразломных тектонитов и метасоматитов преимущественно обогащён  $^{13}\text{C}$ , соответствуя эндогенному. Однако источники углерода и связь углеродизации с теми или иными геодинамическими процессами во многом дискуссионны. Нами впервые рассмотрена эпигенетическая углеродизация в зонах расланцевания в южной части Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона (Западное Прибайкалье) с необычным (обогащённым  $^{12}\text{C}$ ) изотопным составом углерода.

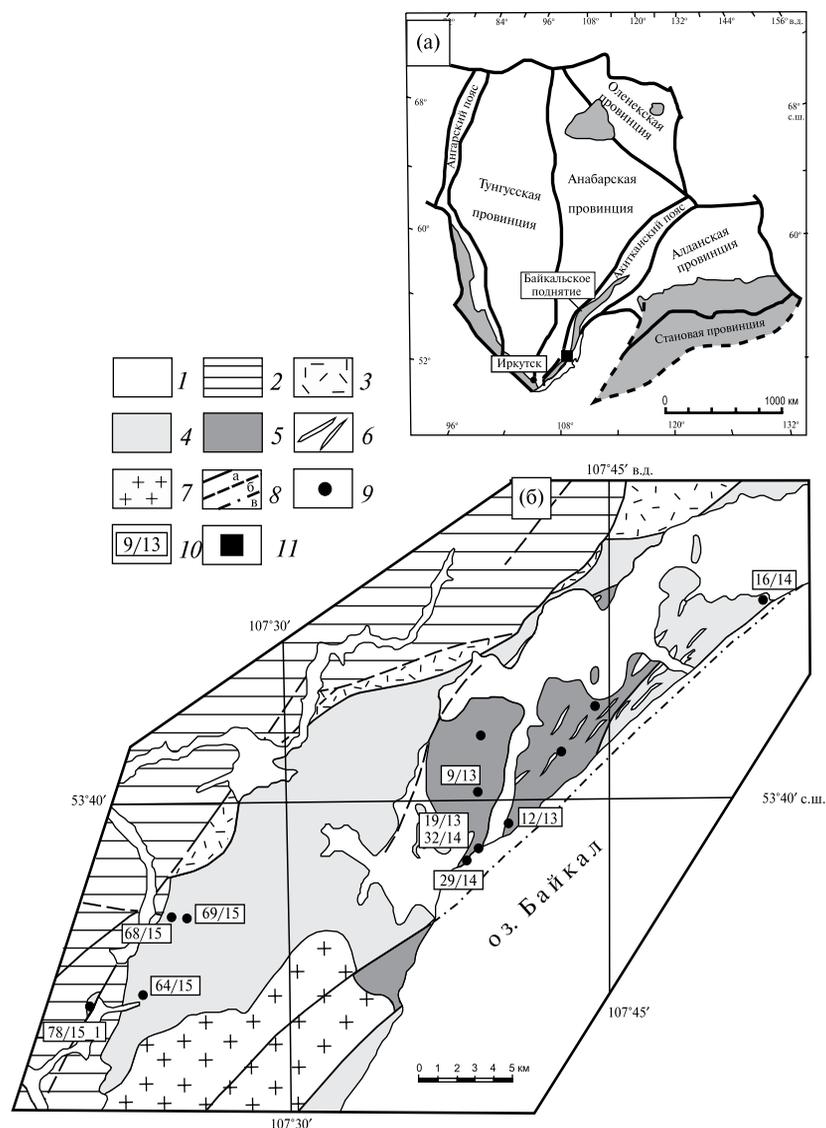
<sup>1</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск

<sup>2</sup>Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской Академии наук, Сыктывкар

\*E-mail: vsavel@crust.irk.ru

Образования Байкальского выступа в структуре Сибирского кратона входят в состав Аkitканского складчатого пояса, который рассматривается как самостоятельная островодужная система позднего палеопротерозоя, надвинутая в процессе амальгамации террейнов в период 1,91–2,00 млрд лет назад на древнее основание (рис. 1) [11, 14]. Байкальский террейн сложен метаморфизованными палеопротерозойскими вулканогенно-осадочными отложениями и гранитоидами неархейского (2,88 млрд лет [14]) и палеопротерозойского (2,02–2,07 млрд лет [9]) возрастов, претерпевшими перекристаллизацию в процессе коллизии Сибирского и Северо-Американского палеоконтинентов в конце палеопротерозоя [4]. Породы основания террейна перекрыты неметаморфизованными вулканогенно-осадочными образованиями аkitканской серии и прорваны постколлизийными гранитоидами с датировками 1,85–1,88 млрд лет [14].

На большей части рассматриваемой территории Байкальского выступа (рис. 1б) развиты образования иликтинской свиты сарминской серии PR<sub>1</sub>, представленные метаэффузивами основного и среднего



**Рис. 1.** Тектоническое районирование Сибирского кратона [11] (а) и схема геологического строения участка работ (по материалам геологической съёмки) (б). 1 — кайнозойские отложения; 2 — карбонатно-терригенные отложения байкальской серии R; 3 — терригенные и вулканогенные образования акитканской серии PR<sub>1</sub>; 4, 5 — сарминская серия PR<sub>1</sub>; 4 — иликтинская свита: хлорит-серицитовые сланцы, песчаники, туфопесчаники, эффузивы основного и среднего состава, 5 — хулуртуйская свита: гнейсы, мигматиты, кварциты, амфиболиты, карбонатные породы; 6 — синметаморфические граниты кочериковского комплекса PR<sub>1</sub>; 7 — посторогенные граниты приморского комплекса PR<sub>1</sub>; 8 — разломы: а — установленные, б — предполагаемые, в — скрытые под водой оз. Байкал; 9 — проявления углеродизации; 10 — места отбора проб на изотопно-геохимические исследования; 11 — участок работ на тектонической схеме. Дайки диабазов и карбонатитов на части б для упрощения не показаны.

составов, филлитами, хлорит-кварцевыми, серицит-хлорит-кварцевыми, кварц-серицитовыми сланцами, содержащими углеродное вещество (УВ), известняками, песчаниками, туфопесчаниками. Среди них выделяется блок площадью около 60 км<sup>2</sup>, сложенный породами нижележащей хулуртуйской свиты: биотитовыми, роговообманково-биотитовыми, роговообманковыми гнейсами и мигматитами, амфиболитами, кварцитами, карбонатными породами, метаморфизованными при 660–700 °С и давлении около

3 кбар. Породы обеих свит интродуцированы синметаморфическими плагиогранитами, гранитами и пегматитами кочериковского комплекса PR<sub>1</sub>, посторогенными гранитами приморского комплекса, дайками карбонатитов с возрастом около 1 млрд лет и дайками диабазов (рис. 16).

На многих участках Хулуртуйского блока метаморфические породы и прорывающие их гранитоиды и диабазы несут следы деформаций, сопровождавшихся замещением биотита мусковитом и хлоритом,

роговой обманки актинолитом, плагиоклаза серицитом. В сростаниях с новообразованным мусковитом часто присутствуют мелкочешуйчатый графит и турмалин (дравит). В береговых обрывах оз. Байкал (рис. 1б) в катаклазированных мусковитизированных мигматитах и хлоритизированном диабазе наблюдаются крутопадающие зоны рассланцевания мощностью до 6 м, сложенные кварц-мусковит-углеродистыми динамосланцами с примесью хлорита, альбита и аксессуарного турмалина. Выходы углеродизированных динамосланцев встречаются и на других участках Хулуртуйского блока, где приурочены к зонам субмеридионального и северо-восточного простирания (рис. 1б).

Исследования УВ, минерального состава пород и измерения изотопного состава углерода выполнены в ЦКП “Геонаука” в ИГ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар) с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA3 (Чехия) с энергодисперсионной приставкой “Oxford Instruments” X-Max, высокоразрешающего рамановского спектрометра HR800, “Horiba Jobin Yvon” (Франция), электронного микроскопа Tesla BS-500 (Чехословакия) и рентгеновского дифрактометра XRD-6000, “Shimadzu” (Япония). Измерения изотопного состава углерода производились в режиме непрерывного потока гелия (CF-IRMS) на аналитическом комплексе, включающем элементный анализатор Flash EA 1112, соединённый через газовый коммутатор ConFlo-IV с масс-спектрометром Delta V Advantage (Германия).

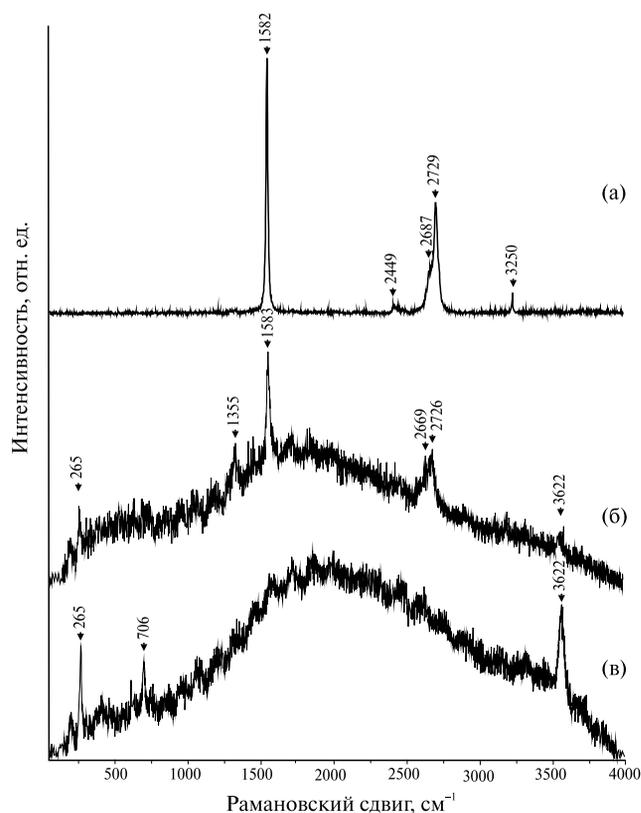
Изучение химического состава пород и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование мусковита выполнено в ЦКП “Геодинамика и геохронология” ИЗК СО РАН, г. Иркутск. Для  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования использовался комплекс ARGUS VI, включающий одноимённый масс-спектрометр, систему очистки газа и высоковакуумную печь. Выделение аргона из мусковита осуществлялось методом ступенчатого нагрева от 470 °С до полного плавления при 1100 °С. Значения возраста рассчитаны относительно стандарта BERN4M с присвоенным ему возрастом  $18,885 \pm 0,097$  млн лет, что позволяет согласовать U–Pb- и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датировки [15]. Содержание  $\text{C}_{\text{эл}}$  (некарбонатного) определено весовым методом.

Рассланцевание мигматитов сопровождалось выносом Ca, Na, Mg, Fe (с переотложением последнего в виде оксидов), Sr, Co, Ni, Zn и возрастанием содержания K, Si, Al, Ba, Rb, Y, Nb. Содержания  $\text{C}_{\text{эл}}$  в динамосланцах достигают 16 мас.%, значительно превышая таковые в породах иликтинской свиты (менее 3 мас.%). Углеродистое вещество в динамос-

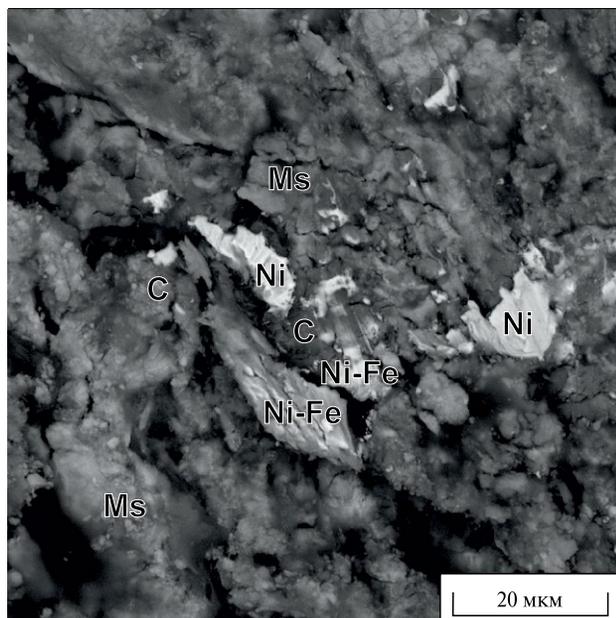
ланцах распределено по сланцеватости или равномерно рассеяно и находится в основном в дисперсном состоянии, но зафиксированы также частицы графита размером около 70 мкм, имеющие пластинчатое строение и параметры элементарной ячейки, отвечающие высокоупорядоченному гексагональному графиту:  $d_{002} = 0,336$  нм,  $d_{004} = 0,168$  нм,  $d_{006} = 0,112$  нм. Методом рамановской спектроскопии получены спектры, типичные для явнокристаллического графита и микрокристаллического графита с остаточными углеводородными радикалами (рис. 2а, б).

В сростаниях с УВ обнаружены самородные металлы и их скопления величиной 10–50 мкм: Ni с примесью Fe ( $\text{Ni}_{0,88-0,94}\text{Fe}_{0,06-0,12}$ ), Sn, цинкистая медь ( $\text{Cu}_{0,88}\text{Zn}_{0,11}\text{Fe}_{0,01}$ ), интерметаллические соединения состава  $\text{Fe}_{0,43-0,60}\text{Ni}_{0,40-0,57}$  (рис. 3), а также сульфиды меди, рутил, монацит, циркон.

Изотопный состав углерода из кварц-мусковитовых динамосланцев по мигматитам и пегматиту ме-



**Рис. 2.** Рамановские спектры УВ из кварц-мусковитовых динамосланцев Хулуртуйского блока (а, б) и филитовидного сланца иликтинской свиты (в): (а) — кристаллический графит, пластинчатое выделение; (б) — микрокристаллический графит-мусковитовый агрегат с остаточными углеводородными радикалами (люминесценция); (в) — рентгеноаморфное выделение битумоида с сильной люминесценцией в мусковите.



**Рис. 3.** Самородный никель и соединение Ni–Fe в углеродизированном динамосланце. Ms — мусковит, С — углеродное вещество.

няется от  $-29,19$  до  $-31,58\%$ . Изотопный состав углерода из рассланцованного диабаза более тяжёлый (табл. 1).

При датировании мусковита получен спектр выделения аргона типа “ступеньки вверх” с выходом пяти наиболее высокотемпературных ступеней в диапазоне температур от  $1010$  до  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  на плато с возрастом  $1947,8 \pm 7,8$  млн лет (рис. 4). Этот возраст может быть несколько моложе истинного возраста кристаллизации мусковита из-за потерь радиогенного Ar при наложенных каледонских тектоно-тер-

мальных событиях, но, по-видимому, близок к истинному возрасту. Наименьший возраст при температуре  $470\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет  $564 \pm 8$  млн лет, однако он может не соответствовать времени реального геологического события (рис. 4).

В сланцах иликтинской свиты УВ характеризуется дисперсным рентгеноаморфным состоянием, явнокристаллический графит не отмечен. В спектрах, полученных от микрозернистых агрегатов УВ, как правило, проявлена люминесценция, но при этом всё же проявляются полосы графита, высота и положение которых свидетельствуют о высокой степени дефектности его структуры и малом размере кристаллитов. Некоторые выделения УВ червеобразной формы с сильной люминесценцией, вероятно, являются графитоподобным веществом с повышенным содержанием битумообразующих компонентов (рис. 2в). По сравнению с углеродом графита из динамосланцев Хулуртуйского блока, УВ из сланцев иликтинской свиты обогащено  $^{13}\text{C}$  (табл. 1). Наиболее лёгкий изотопный состав имеет УВ из окварцованных катаклазированных сланцев.

Приуроченность углеродизации в пределах Хулуртуйского блока к зонам рассланцевания, низкотемпературный минеральный парагенезис динамосланцев, слабая степень окристаллизованности УВ однозначно указывают на проявление углеродизации на ретроградной стадии в процессе наложенных тектонических деформаций. Полученная возрастная датировка позволяет связывать динамометаморфизм с аккрецией Аkitканской складчатой системы с комплексами Анабарской провинции в конце палеопротерозоя [11]. По сравнению с УВ иликтинской

**Таблица 1.** Изотопный состав  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB,‰) углерода графитов

| № п/п                            | № пробы | $\delta^{13}\text{C}$ ,‰ (PDB) ( $\pm 0,2\%$ ) | Порода   |
|----------------------------------|---------|--|--|
| Динамосланцы Хулуртуйского блока |         |  |  |
| 1                                | 9/13    | $-31,58$                                       | Кварц-мусковит-углеродистый динамосланец             |
| 2                                | 19/13   | $-29,19$                                       | То же  |
| 3                                | 32/14   | $-29,35$                                       | Кварц-мусковит-гематит-углеродистый динамосланец     |
| 4                                | 12/13   | $-29,44$                                       | Рассланцованный пегматит                             |
| 5                                | 29/14   | $-24,93$                                       | Рассланцованный диабаз                               |
| Сланцы иликтинской свиты         |         |  |  |
| 6                                | 16/14   | $-27,72$                                       | Катаклазированный кварц-мусковит-хлоритовый сланец   |
| 7                                | 64/15   | $-26,61$                                       | Кварц-серицитовый сланец                             |
| 8                                | 78/15–1 | $-24,15$                                       | Кварц-полевошпатово-серицитовый сланец               |
| 9                                | 68/15   | $-25,39$                                       | То же  |
| 10                               | 69/15   | $-28,12$                                       | Окварцованный кварц-полевошпатово-серицитовый сланец |

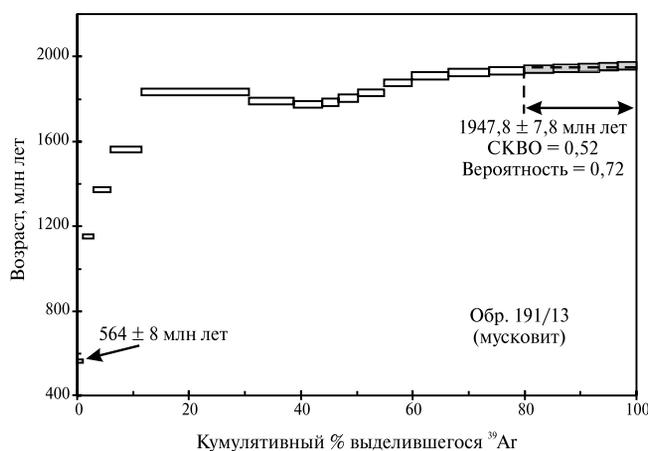


Рис. 4.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возрастной спектр для мусковита.

свиты, значения  $\delta^{13}\text{C}$  которого близки к изотопному составу живой биомассы, углерод динамосланцев (кроме аподиабазового) более изотопно-лёгкий, со значениями  $\delta^{13}\text{C}$ , присущими жидким углеводородам нефти и битумов в изверженных породах [1, 12]. Присутствие углеводородных радикалов в УВ динамосланцев позволяет предполагать, что отложение самородных углерода и металлов происходило из флюида, содержащего углеводороды [10], а парагенезис турмалина с мусковитом указывает на хлоридно-борнокислый состав растворов, под воздействием которых происходило гидротермальное изменение пород [6].

Причиной облегчения изотопного состава углерода в сланцах иликтинской свиты также могло быть воздействие на них флюида, содержавшего углеводороды, тогда как обогащённость углерода из аподиабазового динамосланца изотопом  $^{13}\text{C}$ , вероятно, обусловлена фракционированием изотопов [12]. Базит-гипербазитовый парагенезис металлов в ассоциации с УВ свидетельствует в пользу глубинного источника флюида, при этом обстановка сжатия благоприятствовала стабильности углеводородов [7, 8, 10]. В то же время нельзя исключать и мобилизацию биогенного углерода из сланцев иликтинской свиты при перемещении отдельных блоков земной коры в области высоких температур.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 16-05-00320, 17-05-00819.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. М.: Недра, 1973. 384 с.
2. Готтих Р.П., Писоцкий Б.И. В кн.: Генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: Геос, 2006. С. 23–37.
3. Данилова Ю.В., Савельева В.Б., Данилов Б.С., Шумилова Т.Г. // Руды и металлы. 2015. № 2. С. 5–19.
4. Диденко А.Н., Ефимов А.С., Нелюбов П.А. и др. // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1583–1599.
5. Жмодик С.М., Миронов А.Г., Жмодик А.С. Золото-концентрирующие системы офиолитовых поясов (на примере Саяно-Байкало-Муйского пояса). Новосибирск: Гео, 2008. 304 с.
6. Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических пород. М.: Наука, 1989. 344 с.
7. Маракушев А.А., Маракушев С.А. // ДАН. 2006. Т. 406. № 4. С. 521–527.
8. Летников Ф.А. // Глубинная нефть. 2013. Т. 1. № 6. С. 790–810.
9. Неймарк Л.А., Ларин А.М., Немчин А.А. и др. // Петрология. 1998. Т. 6. № 2. С. 139–164.
10. Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, 1983. 288 с.
11. Розен О.М. // Геотектоника. 2003. № 3. С. 3–21.
12. Руденко А.П., Кулакова И.И. В кн.: Генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: Геос, 2006. С. 68–83.
13. Савельева В.Б., Костицын Ю.А., Травин А.В. и др. // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 2. С. 216–231.
14. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Reddy S.M., et al. // Geol. Soc. London. Spec. Publ. 2009. V. 323. P. 127–143.
15. Ivanov A.V., Meffre S., Thompson J., et al. // Chem. Geol. 2017. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.10.008.

## EPIGENETIC GRAPHITIZATION IN THE BASEMENT OF THE SIBERIAN CRATON — EVIDENCE OF THE MIGRATION OF HYDROCARBON-ENRICHED FLUIDS IN THE PALEOPROTEROZOIC

V. B. Savelyeva<sup>1</sup>, Yu. V. Danilova<sup>1</sup>, T. G. Shumilova<sup>2</sup>, A. V. Ivanov<sup>1</sup>,  
B. S. Danilov<sup>1</sup>, E. P. Bazarova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>2</sup>*N.P. Yushkin Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS F.A. Letnikov March 15, 2017

Received March 25, 2017

For the first time, diagnostics and structural studies of the carbonaceous material (CM) of quartz-muscovite dinamoschists from schistose zones in biotite migmatites, pegmatites and diabases of the southern part of the Baikal ledge of the Siberian craton were performed. The carbonaceous material is represented by clearly and microcrystalline graphite with residual hydrocarbon radicals. Native Ni, Sn, zincous Cu, intermetallic compounds of Fe–Ni composition, copper sulfides, rutile, monazite, and zircon were found in intergrowths with CM. The carbon isotopic composition is from  $-29.19$  to  $-31.58\%$ , with the exception of CM from schistated diabase with  $\delta^{13}\text{C} = -24.93\%$ . The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -dating of muscovite gave an age of  $1947 \pm 7.8$  Ma, indicating a relationship between dynamometamorphism and the accretion of the Akitkan folded system with ancient craton complexes. It is concluded that the deposition of native carbon and metals is caused by the migration of essentially hydrocarbon fluid in the upper crustal formations.

*Keywords:* Siberian craton, Baikal ledge, carbon, graphite, native metals,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -dating.