

Особенности химического состава темноцветных минералов Джелтулинского массива как отражение условий его формирования и глубинного строения (Южная Якутия)

А.И. Иванов*, А.А. Кравченко*, А.И. Зайцев*, Е.Е. Лоскутов*, А.И. Журавлев*, И.Р. Прокопьев**

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Россия

**Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия
e-mail: Leps_2002@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты петрологических расчетов условий кристаллизации нескольких поколений пироксенов и амфиболов из мезозойских магматических пород малоизученного Джелтулинского щелочного массива, являющегося наиболее крупной магматической структурой Тыркандинского рудного района, расположенного в восточной части Алдано-Станового щита. По результатам проведенного авторами определения физико-химических условий, существовавших на момент кристаллизации пироксенов, можно судить о кристаллизации их при различных температурах и на двух глубинных уровнях. Амфиболы более ранних интрузий характеризуются сравнительно высоким содержанием щелочей и алюминия, поздних – кремния. Как и для пироксенов, для амфиболов из пород массива также определены два уровня условий кристаллизации. Сделан вывод о том, что петрологические характеристики темноцветных минералов из пород Джелтулинского массива отражают особенности глубинного строения земной коры, а также, что интерпретированные глубинные аномалии на атрибутивном сейсмическом разрезе основной частоты локальных волновых пакетов, вероятно, показывают существовавшие в мезозое промежуточные магматические камеры и каналы. Кроме этого, связь аномалий с мезозойскими щелочными интрузиями позволяет сделать предположение, что мантийные каналы, выделенные на разрезе основной частоты сейсмических волн, имеют мезозойский возраст.

Ключевые слова: Алдано-Становой щит, щелочной магматизм, петрология, Р-Т параметры, интерпретация геофизических данных.

Благодарности: статья подготовлена по результатам проекта «Стратегически важные виды минерально-сырьевых ресурсов и особенности геологического строения инвестиционно привлекательных территорий Республики Саха (Якутия): металлогения, тектоника, магматизм, геоэкология, совершенствование поисковых и прогнозных технологий» Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие ее производственных сил и социальной сферы на 2016–2020 годы, частично по проекту НИР ИГАБМ СО РАН 0381-2016-0003.

Chemical Composition Features of Dark-Colored Minerals of the Dzheltulinsky Massif as a Reflection of Its Formation Conditions and Deep Structure (Southern Yakutia)

A.I. Ivanov*, A.A. Kravchenko*, A.I. Zaitsev*, E.E. Loskutov*, A.I. Zhuravlev*, I.R. Prokopiev**

*Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia
e-mail: Leps_2002@mail.ru

The work contains results of petrologic estimates of crystallization conditions of several generations of pyroxenes and amphiboles from the Mesozoic igneous rocks of poorly studied Dzheltulin alkali massif, being

ИВАНОВ Алексей Иванович – к.г.-м.н., н.с.; КРАВЧЕНКО Александр Александрович – к.г.-м.н., с.н.с.; ЗАЙЦЕВ Альберт Иванович – к.г.-м.н., зам. директора; ЛОСКУТОВ Евгений Евгеньевич – к.г.-м.н., н.с.; ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович – н.с.; ПРОКОПЬЕВ Илья Романович – к.г.-м.н., н.с.

the biggest magmatic structure of the Tyrkandin ore region, located in the eastern part of the Aldan-Stanovoy shield. According to the results of authors' identification of physical-chemical conditions, existed during pyroxene crystallization, one can judge about their crystallization at different temperatures and at two depth levels. Amphiboles of the earlier intrusions are characterized by relatively high contents of alkalis and aluminium, later intrusion – by high silicon content. Two levels of crystallization conditions are determined for amphiboles from massif rocks, as well as for pyroxenes. It is found that, petrologic characteristics of dark-colored minerals from the Dzheltulin massif rocks reflect features of deep structure of the Earth's crust. It is also concluded that, interpreted depth anomalies at attribute seismic section of the main frequency of local wave packets, probably reflect the Mesozoic intermediate magma chamber and channels. Besides, relation of anomalies with the Mesozoic alkali intrusions suggests that mantle channels identified at section of the main frequency of seismic waves, are of the Mesozoic age.

Key words: Aldan-Stanovoy shield, alkaline magmatism, petrology, P-T parameters, geophysical data interpretation.

Acknowledgments: this article is prepared by the results of the project «Strategically important types of mineral resources and features of the geological structure of investment-attractive territories of the Republic of Sakha (Yakutia): metallogeny, tectonics, magmatism, geoecology, improving search and forecasting technologies» of the Program of Complex Scientific Research in the Republic of Sakha Yakutia), aimed at the development of its productive forces and social sphere for 2016–2020, and partly of a project 0381-2016-0003 of the IGABM SB RAS.

Введение

Для установления условий кристаллизации различных типов магматических пород широко используются данные по химическому составу породообразующих минералов [1–3]. Оценка условий кристаллизации позволяет установить закономерности строения, геодинамические обстановки образования и особенности металлогении рудно-магматических систем. Территория Тыркандинского рудного района в последние годы рассматривается как фрагмент Тыркандинской зоны тектонического меланжа, маркирующей зону раннепротерозойской аккреции молодого кратона – Учурского террейна к древнему кратону, в роли которого выступает Нимнырская площадь (Нимнырский и Сутамский террейны) [4] (рис. 1, А).

Минералогические исследования мезозойских щелочных интрузий в Тыркандинском рудном районе позволят получить дополнительный материал по глубинному строению литосферы в зоне сочленения крупных геологических блоков, уточнить ее геодинамику.

Тыркандинский рудный район с рудопроявлениями золота, радиоактивных и редкоземельных элементов [5] расположен в восточной части Алдано-Станового щита. Мезозойские магматические образования широко представлены полями даек и штоками, сложенными породами монцит-сиенитовой и щелочно-сиенитовой формаций разнообразного состава [6]. Одним из наиболее крупных интрузивных образований рассматриваемой территории является Джелтулинский массив, имеющий площадь выходов пород на дневную поверхность 120 км². В строении массива выделяется шесть групп пород (рис. 1, Б) [6]. Временной интервал эволюции массива по

изотопным данным составляет 138–109 млн. лет по Rb-Sr [6] и 121,1–115,5 млн. лет по Ar-Ar [5].

Методика работ

Минералы были проанализированы в полированных шлифах с графитовым напылением на микронде JSM-6480LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy-350 «Oxford Instruments» при ускоряющем напряжении 20 кВ в ИГАБМ СО РАН. Для автоматического пересчета составов изучаемых минералов на формульные единицы и вычисления различных коэффициентов, а также PT расчетов кристаллизации были использованы программа WinPyrox: A Windows program for pyroxene calculatoin classification and thermobarometry и алгоритмы пересчетов по [7–10].

Результаты петрологических исследований

По химическому составу пироксены всех рассматриваемых пород принадлежат к Ca-Mg-Fe группе моноклинных пироксенов, представленных двумя минеральными видами двух генераций: преобладающим диопсидом и менее распространенным авгитом [11]. На основе геобарометра [12] определено давление, характеризующее условия их образования. Для пироксенов первой группы пород диапазон давления составляет 0,11–0,31 ГПа, второй – 0,14–0,43 ГПа, третьей – 0,11–0,33 ГПа, пятой и шестой групп – 0,71–0,78 ГПа. По рассчитанному температурному режиму (геотермометр [13]) получен диапазон температуры, существовавшей на момент кристаллизации пироксенов: первой группы – 1119–1175 °С; второй – 1120–1167 °С; третьей – 1038–1172 °С; пятой – 1129–1213 °С; шестой группы – 969–1112 °С.

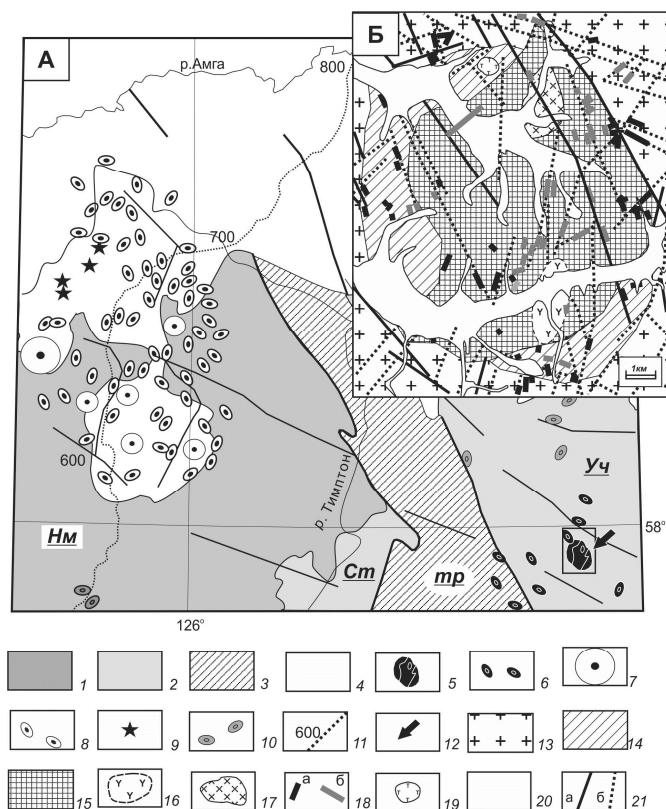


Рис. 1. Схема тектонического строения и локализации мезозойского магматизма Центрально-Алданского и Тыркандинского районов на основе данных [14–16] (А) и Желтулинского массива на основе фондовых материалов с дополнениями [6] (Б):

Усл. обозначения рис. 1, А: 1–3 – вмещающие породы кристаллического фундамента Алдано-Станового щита: 1 – Нимнырского (Нм) гранулит-ортогнейсового террейна, 2 – Сугамского (Ст) и Учурского (Уч) гранулит-парагнейсовых террейнов, 3 – Тыркандинской (*mp*) зоны тектонического меланжа; 4 – венд-кембрийские и юрские осадочные породы чехла нерасчлененные; 5–9 – мезозойские интрузивные щелочные породы: 5–6 – интрузии Тыркандинского рудного района (5 – Желтулинский массив, 6 – небольшие массивы и дайки), 7–9 – интрузии Центрально-Алданского района (7 – крупные массивы, 8 – небольшие массивы и дайки, 9 – диатремы с эруптивными брекчиями минетт, лампроитов, перидотитов, шонкинитов); 10 – интрузии за пределами указанных рудных районов; 11 – опорный геофизический профиль 3ДВ; 12 – площадь, на которой были получены петрологические данные для этой статьи (детализация на рис. 1, Б).

Усл. обозначения рис. 1, Б: 13 – вмещающие породы фундамента – гнейсы и кристаллические сланцы; 14–15 – породы Желтулинского массива: 14 – пуласкиты (редко лаурвикиты), 15 – щелочно-земельные сиениты; 16–17 – интрузирующие массивы шток: 16 – лаурвикитов, 17 – граносиенитов; 18 – дайки: а – пород щелочной серии (пуласкитов и лаурвикитов); б – пород других серий (щелочно-земельных сиенитов, граносиенитов и гранит-порфиров); 19 – тело щелочных трахитов; 20 – четвертичные отложения; 21 – разломы: а – с локально проявленными катаклазитами и милонитами; б – без катаклазитов и милонитов

Амфиболы в изученных породах различны по химическому составу и относятся к кальциевым щелочным разностям и представлены эденитами, реже – Mg-гастингситами и Fe-паргаситами, изменение состава которых отражает смену условий их кристаллизации [17]. Наиболее распространенные амфиболы 2-й генерации – эдениты умеренно глиноземистые с $Al_2O_3 < 6,98\%$, тогда как в амфиболах 1-й генерации – Mg-гастингситах и реже Fe-паргаситах этот показатель заметно выше – $Al_2O_3 > 12,41\%$. Амфиболы 1-й генерации, в отличие от амфиболов 2-й генерации, для всех групп пород характеризуются минимальными содержаниями SiO_2 (38,55–40,78%), наиболее высокими – FeO (19,12–23,34%) и наиболее низкими – MgO (7,09–10,35%).

На основе расчетов по геобарометру [7] и геотермометру [9] кристаллизация амфиболов пород Желтулинского массива проходила в широком P-T диапазоне. Наиболее глубокие условия начала их кристаллизации (1-я генерация, 3-я группа пород) характеризуются давлением 0,67–0,76 ГПа и температурой 964–989 °C, тогда как амфиболы 2-й генерации кристаллизовались в близповерхностных условиях (давление 0–0,2 ГПа при температуре 722–865 °C). В целом наблюдается рост P-T параметров кристаллизации амфиболов от первой группы пород к третьей, с небольшим снижением этих параметров во второй группе. Амфиболы 2-й генерации пород даек также кристаллизовались в близповерхностных условиях.

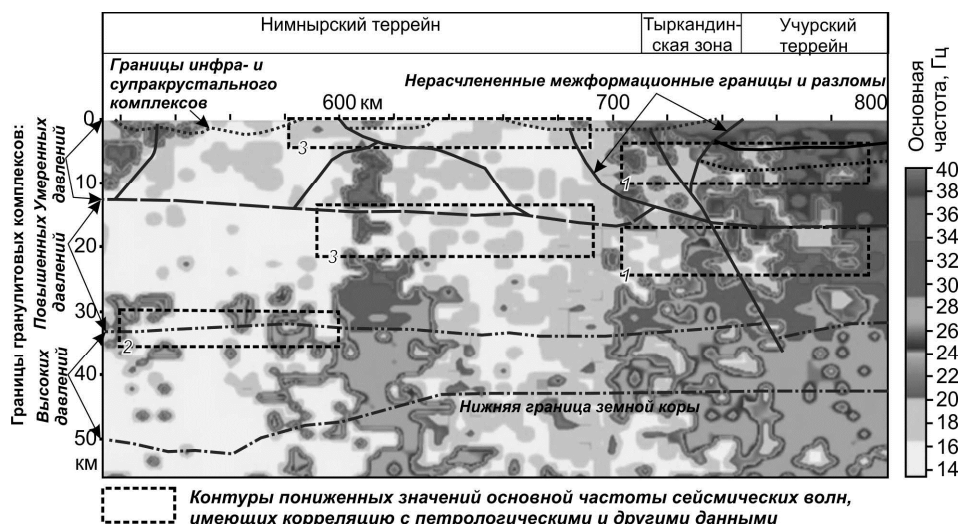


Рис. 2. Сопоставление атрибутивного разреза основной частоты локальных сейсмических волновых пакетов с PT параметрами минералообразования.

Атрибутивный сейсмический разрез по профилю 3-ДВ, согласно [18], границы гранулитовых комплексов по [14]. Подписи контуров на разрезе: 1 – предполагаемые промежуточные камеры мезозойских щелочных интрузий Учурского террейна и Тыркандинской зоны; 2 и 3 – предполагаемые промежуточные камеры мезозойских щелочных интрузий Нимырского террейна: (2 – по данным [20], 3 – по данным [19])

Обсуждение результатов

По результатам определения физико-химических условий, существовавших на момент кристаллизации пироксенов, можно сделать вывод о кристаллизации их на различных глубинных уровнях при температурах от 969 до 1213 °С, давлениях до 0,4 ГПа для пород массива и при температурах от 900 до 950 °С, давлениях 0,6–0,8 ГПа для пород небольших интрузивных тел.

Амфиболы более ранних интрузий характеризуются сравнительно высоким содержанием щелочей и алюминия, поздних – кремния. Как и для пироксенов, для амфиболов из пород массива определены два уровня условий кристаллизации: 950–980 °С, 0,6–0,7 ГПа и 800–850 °С, 0–0,3 ГПа. В дайках присутствуют амфиболы только второго уровня.

По условиям кристаллизации пироксенов и амфиболов обнаружено два уровня давлений 0–0,3 ГПа и 0,6–0,8 ГПа. Сопоставление показывает, что эти уровни по глубине соответствуют межформационным границам комплексов Учурского террейна. В атрибутивном сейсмическом разрезе основной частоты локальных волновых пакетов [18] они выражены понижением основной частоты сейсмических волн до минимальных значений 14–18 Гц (рис. 2). Подобные аномалии встречаются и на уровнях промежуточных магматических очагов 1, 2, 3-го порядков (в интервале глубин 22–14, 10–4 и 3–0 км), выделенных для мезозойских щелочных интрузий Центрально-Алданского района [19, 21], и на уровнях, соответствующих PT параметрам кристаллизации ксенолитов докембрийских пород из мезозойских интрузий этого же района [20] (рис. 3). Та-

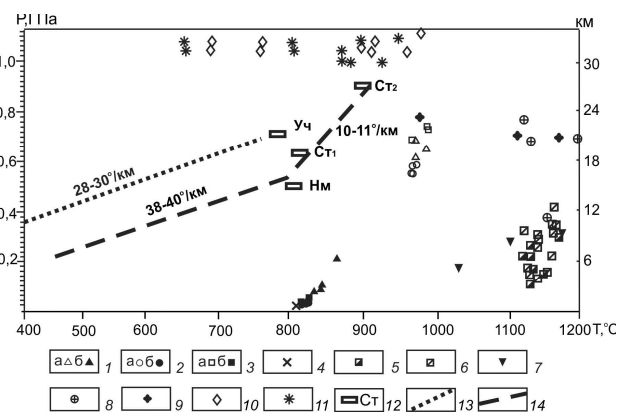


Рис. 3. Положение точек составов минералов на диаграмме PT условий кристаллизации.

Ось абсцисс – температура, °С, ось ординат – давление, ГПа. Усл. обозначения: 1–9 – условия кристаллизации магматических минералов из мезозойских интрузий Учурского террейна: 1–4 – условия кристаллизации амфиболов: 1 – пуласситов (здесь и далее (а) – первая генерация; (б) – вторая генерация), 2 – щелочно-земельных сиенитов, 3 – лаурвикитов, 4 – пород даек, 5–9 – условия кристаллизации пироксенов: 5 – пуласситов, 6 – щелочно-земельных сиенитов, 7 – лаурвикитов, 8 – пород даек, 9 – трахитов; 10–11 – условия кристаллизации минеральных ассоциаций в ксенолитах докембрийских пород из мезозойских интрузий Нимырского террейна: 10 – центральные части зерен, 11 – краевые части зерен минералов; 12–14 – условия метаморфизма окружающих докембрийских пород фундамента: 12 – средние значения PT-параметров метаморфизма для докембрийских комплексов: Уч – Учурского террейна, Нм – Нимырского террейна, Ст₁ – Сугамского террейна на рассматриваемой площади, Ст₂ – Сугамского террейна вне рассматриваемой площади, 13 – тренд регрессивного метаморфизма Тимптоно-Учурской провинции; 14 – тренд регрессивного метаморфизма Центрально-Алданской провинции согласно [14]

ким образом, аномалии, вероятно, отражают существовавшие в мезозое промежуточные магматические камеры. Кроме этого, связь аномалий с мезозойскими щелочными интрузиями позволяет сделать предположение, что мантийные каналы, выделенные [18] на разрезе основной частоты сейсмических волн, имеют мезозойский возраст.

Выводы

В мезозойских щелочных интрузиях Алдано-Станового щита наблюдаются ксенолиты и минералы различных генераций и условий кристаллизации. Условия кристаллизации отражают расположение промежуточных магматических камер. Большая часть камер расположена на глубине около 20 км. Глубина соответствует границе между гранулитовыми комплексами умеренных и повышенных давлений. Граница в период мезозойской магматической активизации была неустойчива к тектоническим напряжениям.

Литература

1. *Wones D.R., Eugster H.P.* Stability of biotite: experiment, theory and application // *Amer. Mineral.* 1985. № 9. P. 1228–1272.
2. *Маракушев А.А., Татарин И.А.* О минералогических критериях щелочности гранитоидов // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1965. № 3. С. 20–37.
3. *Коренбаум С.А.* Типоморфизм слюд магматических пород. М.: Наука, 1987. 144 с.
4. *Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф.* Алдано-Становой щит // *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. М.: Наука/Интерпериодика, 2001. С.81–104.
5. *Прокопьев И.Р., Кравченко А.А., Иванов А.И., Борисенко А.С., Зайцев А.И., Кардаш Е.А., Рожков А.А.* Геохронология и рудоносность Джелтулинского щелочного массива (Алданский щит, Южная Якутия) // *Тихоокеанская геология*. 2018. Т. 37, №1. С. 38–51.
6. *Кравченко А.А., Иванов А.И., Прокопьев И.Р., Зайцев А.И., Бикбаева Е.Е.* Особенности состава и возраст формирования мезозойских интрузий Тыркандинского рудного района Алдано-Станового щита // *Отечественная геология*. 2014. №5. С. 43–53.
7. *Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E.K. et al.* Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons // *Amer. Min.* 1987. V. 72. P. 231–239.
8. *Leake B.E.* Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names // *The Canadian Mineralogist*. 1997. P. 219–246.
9. *Otten M.T.* The origin of brown hornblende in the Artfjallet gabbro and dolerites // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1984. V. 86. P. 189–199.
10. *Yavuz F.* A program to classify microprobe and wet chemical amphibole analyses according to the IMA (1997) nomenclature scheme. Istanbul, 1990.
11. *Yavuz F.* PYROX: A computer program for the IMA pyroxene classification and calculation scheme) // *Computers & Geosciences*. 2001. № 27. P. 97–107.
12. *Nimis P.* Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 2. Structural geobarometers for basic to acid, tholeiitic and mildly alkaline magmatic systems, *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1999. V. 135. P. 62–74.
13. *Putirka K.D.* Thermometers and Barometers for volcanic systems // *Minerals, inclusions and volcanic processes, Reviews in Mineralogy and Petrology, Mineralogical Society of America, Chantilly, Virginia*, 2008. № 69. P. 61–142.
14. *Смелов А.П.* Метаморфизм в архее и протерозое Алдано-Станового щита: Дис. ... д.г.-м.н. Якутск, 1996. 445 с.
15. *Власов В.М., Миронюк Е.П., Тимашков А.Н., Хотина Е.Б.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Лист О-51. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999.
16. *Миронюк Е.П., Магнушевский Э.Л., Власов В.М., Саватьев Н.П., Тимашков А.Н., Хотина Е.Б.* Государственная геологическая карта СССР. Лист О-52. СПб.: ВСЕГЕИ, 1986.
17. *Иванов А.И., Кравченко А.А., Зайцев А.И., Бикбаева Е.Е., Прокопьев И.Р.* Систематика амфиболов магматических пород Джелтулинского массива Тыркандинского рудного района Алдано-Станового щита // *Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России»*. Якутск, 2015. С. 188–190.
18. *Goshko E.Yu., Efimov A.S., Sal'nikov A.S.* The recent structure and the assumed history of formation of the crust in the south-eastern segment of the North Asian craton along Reference Profile 3-DV // *Geodynamics & Tectonophysics*. 5 (3). 2014. P. 785–798.
19. *Абрамов В.А.* Глубинное строение Центрально-Алданского района. Владивосток: Дальнаука, 1995. 180 с.
20. *Kravchenko A.A., Smelov A.P., Popov N.V., Zaitsev A.I., Beryozkin V.I., Dobretsov V.N.* First data on the composition and age of the lower crust of the central part of the Aldan-Stanovoy Shield: results of study of xenoliths from Mesozoic plutons // *Craton Formation and Destruction with special emphasis on BRICS cratons University of Johannesburg, South Africa 21–22 July 2012. Workshop Abstract Volume*. P. 62–63.
21. *Терехов А.В.* Рудоносность гидротермально-метасоматических образований Эльконского золото-урановорудного узла (Южная Якутия): Дис. ... к.г.-м.н. СПб., 2012. 223 с.

Поступила в редакцию 20.10.2017