

05

## Анализ зависимости предела прочности от температуры сверхвысокочастотного нагрева нагруженных гетерогенных материалов (скальных пород) на основе образования роста микротрещин

© М.Г. Менжулин<sup>1</sup>, Х.Ф. Махмудов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> „Горный университет“,  
199106 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 15 ноября 2017 г.

В окончательной редакции 25 октября 2018 г.

Принято к публикации 9 ноября 2018 г.

Анализ зависимости предела прочности гранита от температуры СВЧ-нагрева позволяет выделить следующие характерные участки: при низкотемпературном нагреве до 390 К наблюдается упрочнение; в интервале температур от 390 до 460 К происходит снижение прочности за счет зарождения, роста и слияния более мелких трещин и перераспределения их к границам зерен с образованием межзерновой микротрещиноватости; в интервале температур от 460 до 550 К наблюдается значительное снижение прочности, связанное с разделением зерен на блоки с малой областью концентрации трещин в результате их слияния; при температуре выше 593 К происходит разрушение, раскол образца гранита за счет развития всех видов микротрещин. Разработанная методика определения рациональных параметров воздействия СВЧ-энергией на разупрочнение скальных горных пород в поле стоячих электромагнитных волн позволяет на основании изучения динамики развития наведенной микротрещиноватости обосновать эффективные параметры воздействия СВЧ-энергии на кварцсодержащие горные породы для их разупрочнения и разрушения.

DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47465.2563

### Введение

Известен способ разрушения гетерогенного материала (горных пород) в результате СВЧ-воздействия [1–23]. СВЧ-электромагнитное излучение (нагрев) проникает в кварцсодержащую горную породу на достаточно большие глубины, испытывая частичное поглощение по мере воздействия [24–27]. Гранит состоит из набора различных по химическому составу основных минералов: кварц, полевой шпат, слюда, которые ведут себя по разному по отношению к СВЧ-нагреву. Каждая из минеральных компонент обладает своими индивидуальными электрическими свойствами, которые обуславливают поглощение. Даже при относительно невысоких температурах напряжения у границ отдельных минералов могут превысить [28–38] макроскопические пределы прочности минералов и могут возникнуть растягивающие напряжения, приводящие к разрушению [39,40]. Причиной этого является неравномерное расширение кварца по различным кристаллографическим направлениям.

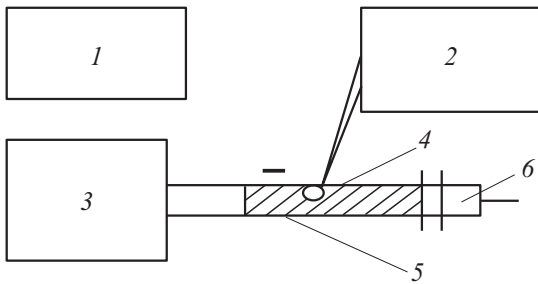
### Методика измерений

Определение прочности скальной породы при СВЧ-нагреве выполнялось с помощью установки частотой 2375 МГц с выходной мощностью 2.0 kW (рис. 1).

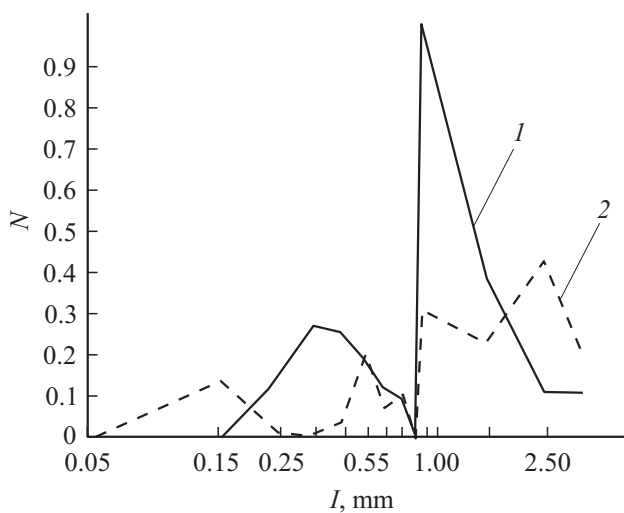
Отметим интересные конструктивные особенности установки, приведенной на рис. 1. СВЧ-энергия от генератора разветвляется на две равные части и подается с обоих концов цепочки типа связанных резонаторов (диафрагмированного волновода) навстречу друг другу через коаксиально-волноводные переходы. В этом случае получается более „мягкий“ нагрев породы, с противоположной стороны размещается экран так, чтобы вектор напряженности электрического поля был направлен перпендикулярно к его поверхности. СВЧ-нагревом образца ( $S = 45 \text{ W/cm}^2$ ) обеспечивалась плотность тепловых источников  $q = 2.5 \text{ W/cm}^2$ . Объектом исследования явились характерные типы гранитов Ленинградской области: гранит с размером зерен от 0.4 до 4.5 mm и содержанием минералов в его составе: кварц — 30%, калиевый полевой шпат — 50%, плагиоклаз — 10% и биотит — 10%. Образец гранита в виде бруска сечением  $90 \times 45 \text{ mm}$  длиной 200 mm помещался в волноводный тракт. Одна из сторон образца шлифовалась микропорошками К3-10, М-20, а затем полировалась порошками окиси хрома до получения равномерной зеркальной поверхности. В процессе нагружения регистратор (прибор АСК-3106 (P-52/2)) вычерчивает диаграмму сжатия. Предел прочности породы определяют по формуле

$$\sigma_{\text{сomp}} = P/F_0$$

где  $P$  — нагрузка, соответствующая разрушению,  $F_0$  — площадь сечения образца. Для оценки прочности скаль-



**Рис. 1.** Блок-схема стенда СВЧ-нагрева: 1 — панорамный измеритель АСК-3106 (P-52/2), 2 — измеритель напряжения Щ68002-01, 3 — СВЧ-генератор  $P = 2.0 \text{ kW}$ ,  $F = 2375 \text{ MHz}$ , 4 — термопара (FLUKE 561), 5 — образец, 6 — поршень.



**Рис. 2.** Распределение  $N$  трещин по длине до нагружения (1) и при СВЧ-нагреве (2). 1 —  $n_{239 \text{ K}} = 235$  (при 239 K), 2 —  $n_{433 \text{ K}} = 474$  (при 433 K).

ных пород известен способ определения длительной прочности материала [40]. Этот способ относится к анализу материалов путем определения их физических свойств, к определению механического состояния нагруженных материалов, их долговечности и может использоваться для определения времени до возникновения предразрывного состояния в результате накопления трещин в материале [41,42].

При нагружении скальной породы происходит накопление мелких трещин до их некоторой критической концентрации  $N = n_v$ ; в единице объема, после чего начинается их попарное слияние с образованием укрупненных трещин. Предельная концентрация трещин длина  $l_i$  в единице объема  $N = 1/K^3 l_i^3$ , где  $K$  — концентрационный параметр слияния трещин, т.е. отношение двух таких длин трещин  $l_2$  и  $l_1$ , при которых концентрация трещин наибольшая.

Параметры  $l_2$  и  $l_1$  находят из графиков распределения трещин для данной температуры СВЧ-нагрева (рис. 2).

Определение распределения концентрации трещин  $n_0$  и  $n_1$  по размерам  $l_0$  и  $l_1$  осуществлялось с помощью микроскопа „Мир-2“.

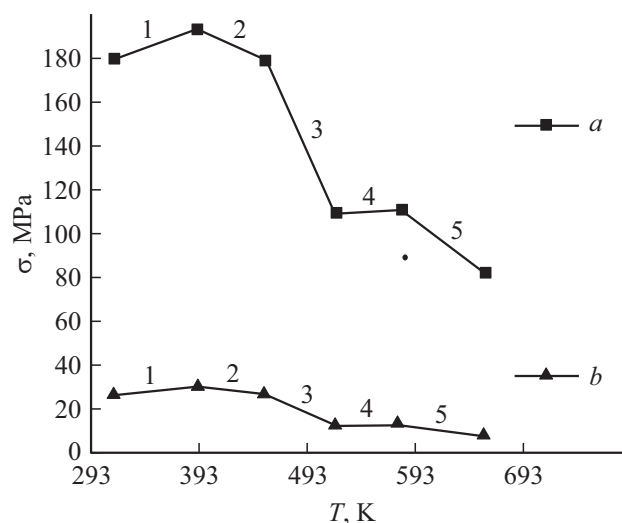
Для определения кинетики развития трещин при СВЧ-нагреве предварительно определялась естественная трещиноватость образца  $n_{293 \text{ K}} = 235$  (при 293 K) в единице объема в заданной точке (рис. 2, кривая 1). Для сравнения вероятностей нахождения трещин, соответствующих двум интервалам измерений  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$ , удобнее находить плотности вероятностей  $f = (\Delta n_i) / (\Delta l_{i,2} n_\Sigma)$  и по величине  $F = f l_i^2$  определять, трещины какой длины вносят основной вклад в разрушение [27,28,36].

После СВЧ-нагружения образца в течении времени  $t$  осуществлялось измерение температуры  $T$  образца гранита в той же заданной точке в единице объема с помощью термопары, вводимой в щель волноводного тракта, прорезанной по широкой стенке волновода. Установка нагрева включала никель-хром-никелевую термопару, подсоединенную к измерителю температуры Fluke 586 (рис. 1).

Затем под микроскопом определялась в заданной точке и единице объема качественная структура дефектов  $n_{433 \text{ K}} = 474$  (при 433 K) (рис. 2, кривая 2), межзерновая трещиноватость, формирование субблоков, развитие макротрещин и развитие трещин по зерну.

После измерений распределения концентраций трещин  $n_i$ , по размерам  $l_i$ , при различных температурах СВЧ-нагрева (рис. 2, кривая 2) рассчитывались концентрационный параметр слияния трещин  $K = l_2/l_1$  и предельная концентрация трещин длиной  $l_i$  в единице объема. На основании выполненных в работах [3,6] исследований наведенной трещиноватости, структуры трещин и прочности породы выделены основные стадии электромагнитного разупрочнения (см. таблицу).

На основании графиков распределения концентраций наведенных микротрещин при СВЧ-нагреве определены концентрационный параметр слияния трещин  $K(T)$  и критическая концентрация разрушения  $N(T)$ . Также на



**Рис. 3.** Зависимости пределов прочности гранита от температуры;  $a$  — предел прочности на сжатие,  $b$  — предел прочности на растяжение.

Стадии разупрочнения гранита при СВЧ-нагреве

№	$T$ , К	$t$ , min	$\sigma_{comp}$ , МПа	$\sigma_{stretch}$ , МПа	Структура дефектов (трещин)	Технология
1	293–390	2	195	30	Частичное закрытие	Сушка
2	390–460	2–4	195–110	26–12	Межзерновые трещины	Дезинтеграция
3	460–550	4–6	110–112	12–12.4	Формирования субблоков	Дробление
4	550–593	6–10	112–82	12–7	Развития микротрещин	Дробление
5	593–660	< 10	< 80	< 7	Все виды трещин	Измельчение

основании расчетов получена температурная зависимость прочности  $\sigma(T)$ , (рис. 3).

Анализ зависимости предела прочности от температуры СВЧ-нагрева позволяет выделить следующие характерные участки (рис. 3):

- участок 1 — упрочнение гранита при низкотемпературном нагреве до 390 К;
- участок 2 — снижение прочности гранита в интервале температур от 390 до 460 К за счет зарождения, роста и слияния более мелких трещин и перераспределения их к границам зерен с образованием межзерновой микротрещиноватости;
- участок 3 — значительное снижение прочности гранита в интервале от 460 до 550 К, связанное с разделением зерен на блоки с малой областью концентрации трещин в результате их слияния, формирования субблоков;
- участок 4 — разрушение, раскол образца гранита за счет развития макротрещин в пучностях электрического поля при температуре 550–593 К;
- участок 5 — развитие всех видов микротрещин при 593–660 К.

Для выделения чистых фракций минералов при селективной дезинтеграции рекомендуется вести обработку при температуре 390–460 К, тогда изменение напряженного состояния способствует образованию межзерновой трещиноватости, что вызывает разупрочнение зерен кварца по их границам и повышает селективность их раскрытия. Экспериментально установлено, что при обработке гранита в режиме первой стадии разделение на чистые фракции размером 1.4 mm составило 98%. При механическом дроблении чистота минеральных фракций достигает 80% только для фракции размером 0.1 mm [6].

## Обсуждения результатов

Как отмечалось выше, гранит состоит из набора различных по химическому составу основных минералов, обладающих своими электрическими свойствами, обуславливающими поглощение. С другой стороны, могут быть введены и некоторые усредненные диэлектрические параметры среды (для гранита  $\epsilon = 5$ ,  $\text{tg } \delta = 0.015–0.018$  на частоте 2.4 GHz). В начальный момент времени воздействия СВЧ-энергии на породу, когда теплопроводность еще не успевает проявиться, наблюдается существенная неоднородность температуры нагрева минера-

лов, входящих в состав данной породы. Кроме того, благодаря разнице в температурах и коэффициентах термического расширения наблюдаются существенно различные по параметрам микронапряжения, что усугубляется наличием структурной неоднородности и естественной микротрещиноватости, приводящих к появлению концентраций напряжений. Наиболее четко эффективность теплового воздействия проявляется вследствие полиморфного превращения  $\alpha$ -кварца в  $\beta$ -кварц в интервале температур 573–575 К и сопровождается мгновенным увеличением объема на 0.86% [2,25,43,44]. Эффективность применения электромагнитного излучения для разупрочнения крепких горных пород может быть достаточно убедительно обоснована на основе сопоставления процессов развития микротрещиноватости при двух типах нагрева, конвекционном и СВЧ [3,6,31]. Для гранитов характерны следующие категории структуры минералов с порогом их насыщения дефектоемкостью:

- минералы с жесткой структурой и с низким порогом дефектоемкости (26% кварца);
- минералы с подвижной структурой, высокой растворимостью дефектов и высоким порогом насыщения дефектоемкости (5% слюда);
- минералы с переменной структурой, состоящие как из жестких структурных элементов, так и из подвижных связующих, поэтому значение дефектоемкости и ход насыщения в таких структурах имеют монотонно-дискретный характер (36% полевые шпаты).

Характер разупрочнения и разрушения скальных горных пород определяется температурным режимом, формированием локальных зон нагрева и зон термоупругих напряжений. Эффективность применения СВЧ-энергии определяется способностью породы поглощать электромагнитную энергию. Удельная мощность поглощения

$$P_{spec} = 2\pi f \epsilon' \text{tg } \delta |E|^2,$$

где  $\epsilon'$  — диэлектрическая проницаемость,  $\text{tg } \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь,  $f$  — частота,  $E$  — напряженность электрического поля. В условиях квазиadiaбатического нагрева повышение температуры в заданной точке породы определяется выражением  $T = P_{spec}t/c$ , где  $t$  — время,  $c$  — объемная теплоемкость породы.

Разрушение нагруженных твердых тел является термоактивированным процессом [34–38,45], причем время ожидания разрушения при напряжении  $\sigma$  и абсолютной

температуре  $T$  описывается формулой С.Н. Журкова [45]:

$$\tau = \tau_0 \exp((U_0 - \gamma\sigma)/RT),$$

где  $\tau$  — время до разрушения,  $\tau_0$  — период атомных колебаний,  $U_0$  — энергия активации,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура материала,  $\sigma$  — приложенное напряжение,  $\gamma$  структурный коэффициент. Однако этот способ не позволяет оценить стадии разупрочнения скальной породы в процессе нагружения с учетом дефектной структуры, так как дальнейшие шаги связаны с исключением из формулы параметра  $\gamma$ .

Предлагаемый способ определения разупрочнения нагруженных при СВЧ-нагреве скальных горных пород позволяет устранить указанный недостаток и повысить эффективность разупрочнения скальных горных пород при добыче и переработке минерального сырья при оптимальных режимах электромагнитного нагружения и обусловленного им развития микротрещиноватости.

## Выводы

1. В результате температурных исследований выявлен механизм структурного состояния основных минералов кварцсодержащих горных пород (гранитов), на основании которых можно сделать прогнозную оценку снижения прочности и их технологических свойств в результате воздействия СВЧ-поля.

2. Как показали исследования, при нагревании образца до 390 К в течении 2 min происходит частичное закрытие микротрещиноватости на 50% (технология в режиме 1-й стадии, сушка).

3. В процессе экспериментов удалось проследить развитие различных типов микротрещиноватости в граните в зависимости от времени воздействия СВЧ-энергии:

- в режиме 2-й стадии структурных изменений (493 К,  $t = 4$  min) происходит разупрочнение породы в результате развития микротрещин по границам зерен минералов (технология в режиме 2-й стадии, дезинтеграция);

- в режиме 3-й, 4-й стадий структурных изменений (560 К,  $t = 6$  min) наблюдаем в структуре гранита образование субблоков, развитие микротрещин (технология в режиме 3-й, 4-й стадий, дробления);

- в режиме 5-й стадии структурных изменений при температуре выше 673 К происходит разупрочнение и разрушение гранита в результате развития всех видов микротрещиноватости без какого либо внешнего механического напряжения (технология в режиме 5-й стадии, измельчения).

При разделении минерального сырья на уровне минеральных агрегатов с целью последующей отсортировки пустой породы эффективность разупрочнения может быть достигнута в режиме второй стадии, где происходит формирование субблоков. При дроблении породы выбирается режим, соответствующий третьей стадии. Режим четвертой стадии разупрочнения используется

в технологическом цикле измельчения. Результаты используются для практических рекомендаций при выборе режимов СВЧ-электромагнитного воздействия и технологической стадии разупрочнения, соответствующих заданной технологии.

В заключении автор выражает благодарность О.И. Казанину за плодотворное обсуждение результатов.

## Список литературы

- [1] Основы разупрочнения мерзлых пород СВЧ-полями. Л.: ЛГИ, 1982. С. 28–42.
- [2] Sahoo B.K., De S., Carsky M., Meikap B.C. // Ind. Eng. Chem. Res. 2010. Vol. 49. N 6. P. 3015–3021.
- [3] Менжулин М.Г., Соколова Н.В., Шишов А.Н., Хоминский В.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 1999. № 3. С. 164–167.
- [4] Hui Bo Zhang, Yuemin Zhao, Chenyang Zhou, Chenlong Duan, Liang Dong // Energy Fuels. 2015. Vol. 29. N 2. P. 1243–1248.
- [5] Kingman S.S., Snape C.E., Robinson J.P. // Chem. Res. 2007. Vol. 46. N 14. P. 4811–4818.
- [6] Менжулин М.Г., Соколова Н.В., Шишов А.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2000. № 8. С. 229–233.
- [7] Lester E., Kingman S., Dodds C., Patrick J. // Fuel. 2006. Vol. 85. P. 2057–2063.
- [8] Ruisanchez E., Arenillas A., Juarez-Perez E.J., Menendez J.A. // Fuel. 2012. Vol. 102. P. 65–71.
- [9] Menendez J.A., Arenillas A., Fidalgo B., Fernandez Y., Zubizarreta L., Calvo E.G., Bermadez J.M. // Fuel. Proc. Technol. 2010. Vol. 91. P. 1–8.
- [10] Menendez J.A., Juarez-Perez E.J., Ruisanchez E., Bermadez J.M., Arenillas A. // Carbon. 2010. Vol. 49. P. 346–349.
- [11] Kanilo P.M., Kazantsev V.I., Rasyuk N.I., Schunemann K., Varviv D.M. // Fuel. 2003. Vol. 82. N 2. P. 187–193.
- [12] Varviv D.M., Kazantsev V.I., Kanilo P.M., Rasyuk N.I., Schunemann K., Crytsayenko S.V. // Telecommunication and Radio Engineer. 2004. Vol. 61. N 8. P. 650–662.
- [13] Hardgrove R.M. // Trans. Am. Soc. Mech. Eng. 1932. Vol. 54. P. 37–46.
- [14] Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учебник для вузов. М.: Недра, 1980. 415 с.
- [15] Austin L.G., Bagga P., Celik M. // Powder Technol. 1981. Vol. 28. P. 235–240.
- [16] Kingman S.W., Rowson N.A. // Mineral Engineer. 1998. Vol. 11. N 11. P. 1081–1088.
- [17] Delibalta M.S., Toraman O.Y. // Energy Sci. Technol. 2012. Vol. 3. N 2. P. 46–49.
- [18] Sahoo B.K., Dea S., Meikap B.C. // Fuel. Proc. Technol. 2011. Vol. 92. P. 1920–1928.
- [19] Sahoo B.K., De S., Carsky M., Meikap B.C. // Ind. Eng. Chem. Res. 2010. Vol. 49. P. 3015–3021.
- [20] Kingman S. Microwave Pre-Treatment of Coal and Coal Blends to Improve Milling Performance. BCURA Project B76, Final Report-January 2006.

- [21] Диденко А.Н. СВЧ энергетика теория и практика. М.: Наука, 2003.
- [22] *Samanli S.* // Fuel. 2011. Vol. 90. P. 659–664.
- [23] Красновский С.С., Ариш Э.И., Друкованный М.Ф. // Известия ДГИ. 1961. Т. 40. С. 124–130.
- [24] Красновский С.С., Захаров Ю.Н. Новые возможности высокочастотного контактного способа разрушения горных пород. Тез. докл. Неделя горняка. М.: МГГУ, 1994. С. 193.
- [25] Песчанская Н.Н., Синани А.Б. // ФТТ. 2008. Т. 50. Вып. 1. С. 177–181.
- [26] Кожушко А.А., Синани А.Б. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 812–815.
- [27] Ставрогин А.Н. // Записки Горного института. 2004. Т. 156. С. 44–46.
- [28] Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Мансуров В.А., Султонов У., Рустамова М.З. // ФТПРПИ. 2009. № 4. С. 55–59.
- [29] Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Ильинов М.Д., Абдурахмонов З.М. Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального ун-та. 2014. № 3 (20). С. 98–108.
- [30] Махмудов Х.Ф. // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 8. С. 41–45.
- [31] Менжулин М.Г., Шишов А.Н., Серышев С.В. // ВНИМИ. 1995. С. 59–65.
- [32] Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Манжиков Б.Ц. // ФТПРПИ. 2010. Т. 4. С. 29–40.
- [33] Махмудов Х.Ф., Менжулин М.Г., Захарян М.В., Султонов У., Абдурахмонов З.М. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 79–85.
- [34] Махмудов Х.Ф. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 1. С. 76–86.
- [35] Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С. // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 856–859.
- [36] Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С., Султонов У. // Вестник Тамбовского ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 4–2. С. 1667–1668.
- [37] Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Щербаков И.П. Наука сегодня: теория, практика, инновации. Ростов-на-Дону, 2014. С. 159–187.
- [38] Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Щербаков И.П. LAMBERT Academic.
- [39] Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. М.: Недра, 1978. 303 с.
- [40] Пат. РФ № 2167404. Способ определения длительной прочности материала / В.А. Петров, Г.В. Петров. 05.05.1999.
- [41] Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф. // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 6. С. 915–923.
- [42] Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 7. С. 1040–1048.
- [43] Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х.Ф. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 8. С. 1182–1184.
- [44] Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х.Ф. // ФТТ. 2017. Т. 59. Вып. 3. С. 556–558.
- [45] Журков С.Н. // Вестник АН СССР. 1968. № 3. С. 46–52.