

- Berg J. H., Wheeler E. P. Osumilite of deep-seated origin in the contact aureole of the anorthositic Nain complex, Labrador // *Amer. Miner.* 1976. Vol. 61. P. 29—37.
- Brown G. E., Gibbs G. V. Refinement of the crystal structure of osumilite // *Amer. Miner.* 1969. Vol. 54. P. 101—116.
- Chinner G. A., Dixon P. D. Irish osumilite // *Miner. Mag.* 1973. Vol. 39. P. 189—192.
- Deer W. A., Howie R. A., Zussmann J. *Rock-Forming Minerals. 1B: Silicates and Ring Silicates*, Second edition. London: Geological Society, 1986. P. 541—558.
- Elmi C., Brigatti M. F., Pasquali L., Montecchi M., Laurora A., Malferrari D., Nannarone S. Crystal chemistry, surface morphology and X-ray photoelectron spectroscopy of Fe-rich osumilite from Mt. Arci, Sardinia (Italy) // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2010. Vol. 37. P. 561—569.
- Grew F. S. Osumilite in the sapphirine-quartz terrane of Enderby Land, Antarctica: implications for osumilite petrogenesis in the granulite facies // *Amer. Miner.* 1982. Vol. 67. P. 762—787.
- International Mineralogical Association: Commission on New Minerals and Mineral Names // *Miner. Mag.* 1980. Vol. 43. P. 1053—1055; <http://pubsites.uws.edu.au/ima-cnmnc/imalist.htm&sa>
- Miyashiro A. Osumilite, a new silicate mineral, and its crystal structure // *Amer. Miner.* 1956. Vol. 41. P. 104—116.
- Petríček V., Dušek M., Palatinus L. Jana2006. Structure Determination Software Programs. Praha: Institute of Physics, 2006.
- Seryotkin Y. V., Sokol E. V., Bakakin V. Y., Likhacheva A. Y. Pyrometamorphic osumilite: occurrence, paragenesis, and crystal structure as compared to cordierite // *Eur. J. Miner.* 2008. Vol. 20. P. 191—198.
- Schreyer W., Hentschel G., Abraham K. Osumilith in der Fifel und die Verwendung dieses Minerals als petrogenetischer Indikator // *Tschermaks Miner. Petrogr. Mitteil.* 1983. Vol. 32. P. 215—234.

Поступила в редакцию
15 февраля 2012 г.

УДК 549.762 — 548.736 (571.66)

ЗРМО. № 4. 2012 г.
Zapiski RMCh. N 4. 2012

© Д. чл. М. И. МУРАШКО*, Д. чл. И. В. ПЕКОВ**, Д. чл. С. В. КРИВОВИЧЕВ***,
Д. И. ЧЕРНЯТЬЕВА***, В. О. ЯПАСКУРТ*, А. Е. ЗАДОВ****, М. Е. ЗЕЛЕНСКИЙ*****

СТЕКЛИТ $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$: НАХОДКА НА ВУЛКАНЕ ТОЛБАЧИК (КАМЧАТКА, РОССИЯ), УСТАНОВЛЕНИЕ СТАТУСА МИНЕРАЛЬНОГО ВИДА И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА¹

* ЗАО «Систематическая минералогия», 199178, Санкт-Петербург, 11-я линия, 44,
e-mail: miznashko@gmail.com

** Московский государственный университет, геологический ф-т, 119991, Москва, Воробьевы горы

*** Санкт-Петербургский государственный университет, геологический ф-т,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

**** НИИ «Теплохим», 127238, Москва, Дмитровское шоссе, 71

***** Институт экспериментальной минералогии РАН,
142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Институтская, 4

Стеклит $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ установлен в возгонах фумаролы Яловитая на Втором шлаковом конусе Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения, вулкан Толбачик, Камчатка, Россия. По результатам изучения этого материала он утвержден Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации ММА как минеральный вид (ИМА №. 2011-041). Эмпирическая формула (расчет на O_8): $(\text{K}_{0.997}\text{Na}_{0.003}\text{Ca}_{0.004})_2 1.009(\text{Al}_{0.925}\text{Fe}^{2+}_{0.066}\text{Mg}_{0.015}\text{Mn}_{0.001})_2 \text{O}_{995}\text{S}_{2.004}\text{O}_8$. Стеклит тригональный. $P321$, $a = 4.7281(3)$, $c = 7.9936(5)$ Å, $V = 154.76(17)$ Å³, $Z = 1$. В структуре стеклита (изучена на микродвойникованном монокристалле, $R = 0.0732$) тетраэдры SO_4 соединены по общим O-вершинам с искаженными тригональными призмами AlO_6 с образованием слоев $[\text{Al}(\text{SO}_4)_2]_2$, компланарных (001), а катионы K располагаются в межслоевом пространстве. Яловитый образец стеклита с Толбачика передан в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН в Москве.

¹ Стеклит в качестве минерального вида и его название утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации ММА 2 июня 2011 г. (ИМА No. 2011-041).

Ключевые слова: стеклиты, фумарол, вулкан Толбачик

M. I. MURASHKO, I. V. PEKOV,
A. E. ZADOV, M. E. ZELENSKIY
(KAMCHATKA, RUSSIA).

Steklite, $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$, has been found in the second scoria cone of the Norcano at Kamchatka. On the basis of the study of this material, it is approved by the Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification of the International Mineralogical Association as a mineral species. The name steklite has been recommended as an analog of the technogenic analogue from the Russian steklo — glass, with Tolbachik, steklite associates with henatite, lyonsite, etc. It occurs in openwork aggregates of up to 30 μm in thickness. The cleavage is (001) prismatic, optically uniaxial (-), α = 1.5476. The empirical formula (calculated on O_8) is: $(\text{Al}_{0.925}\text{Fe}^{2+}_{0.066}\text{Mg}_{0.015}\text{Mn}_{0.001})_2 \text{O}_{995}\text{S}_{2.004}\text{O}_8$. Steklite is trigonal. $P321$, $a = 4.7281(3)$, $c = 7.9936(5)$ Å, $V = 154.76(17)$ Å³, $Z = 1$. In the structure of steklite (studied for a microtwinning, AlO_6 regional prisms to form the interlayer space. The type specimen is from the Kamchatka Museum of the Russian Academy of Sciences.

Key words: steklite, new mineral, volcano, Kamchatka.

Тригональный сульфид «стеклит». Он широко применяется в медицине как косметическое средство.

В природе аналогичных соединений на современном этапе (1962). Позже она отмечена в Исаляко Минералогической характеристике, лицевать синтетическом $c = 7.96$ Å, фиксирующе

В качестве минералогического в составе высокотемпературных месторождений Восточного обнаружил Б. В. Чесноков № 47 в Копейске на Южном анализе и порошковой спектроскопии тригонального $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ казатели преломления, также химические свойства от русского слова «стекло».

auricle of the anorthositic Nain
:// Amer. Miner. 1969, Vol. 54

P. 189–192.
ates and Ring Silicates, Second

i D., Nannarone S. Crystal che-
sumilite from Mt. Arci, Sardinia

Antarctica: implications for osu-
52—787.

s and Mineral Names // Mmer,
nalist.htm&sa

// Amer. Miner. 1956, Vol. 41.

ftware Programs, Praha: Institu-

rphie osumilite: occurrence, pa-
8, Vol. 20, P. 191–198.

/erwendung dieses Mineral als
32, P. 215—234.

Поступила в редакцию
15 февраля 2012 г.

РМО, № 4, 2012 г.
Zapiski RMO, N 4, 2012

КРИВОВИЧЕВ ***
Е. И. ЗИЛИК КНИЖНИК ***

Е. ТОЛБАЧИК О СТАТУСЕ ЭТОГО СТРУКТУРА

бург, 11-я линия, 44;

191, Москва, Воробьевы горы
геологический ф-т,

5, 7/9

телефон: 71

и РАН,

ул. Косыгина, 4

Втором шлаковом конусе Се-
вулкан Толбачик, Камчатка,
иссией по новым минералам,
№. 2011-041). Эмпирическая
($Mg_{0.003}Mn_{0.001}Ca_{0.995}S_{2.001}O_8$,
76(17) Å, Z = 1. В структуре
32) тетраэдры SO_4 соединены
АЮ₆ с образованием слоев
желобчатом пространстве. На-
званием им. А. Е. Фермана РАН

иссией по новым минералам,

Ключевые слова: стеклит, новый минеральный вид, сульфат, кристаллическая структура, возго-
пы фумарол, вулкан Толбачик, Камчатка.

M. N. MURASHKO, I. V. PEKOV, S. V. KRIVOVICHEV, A. P. CHERNYATYEVA, V. O. YAPASKURT,
A. E. ZADOV, M. E. ZELENSKY. STEKLITE, $KAl(SO_4)_2$: THE FIND AT TOLBACHIK VOLCANO
(KAMCHATKA, RUSSIA), VALIDATION AS A MINERAL SPECIES AND CRYSTAL STRUCTURE

Steklite, $KAl(SO_4)_2$, has been found in the sublimate of Yadovitaya («Poisonous») fumarole at the
Second scoria cone of the Northern Breakthrough of the Great Tolbachik Fissure Eruption, Tolbachik vol-
cano at Kamchatka. On the base of results of its study, it was approved by the IMA Commission on New
Minerals, Nomenclature and Classification (CNMNC) as the valid mineral species (IMA N 2011-041).
The name steklite has been remained for the mineral — as it was named by Chesnokov et al. (1995) for its
technogenic analogue from burnt dump of the coal mine N 47 at Kopeisk (the South Urals, Russia); from
the Russian *steklo* — glass, with allusion to the visual similarity of its lamellae to thin glass platelets. At
Tolbachik, steklite associates with alumoklyuchevskite, langbeinite, euschlorine, fedotovite, chalcocyanite,
hematite, lyonsite, etc. It occurs as hexagonal or irregularly shaped lamellar crystals (with principal form
{001}) up to 30 μm in thickness, and up to 0.2 mm, rarely to 1 mm in width, often split. They are combin-
ed in openwork aggregates or thin crusts up to 1.5×2.5 cm. Steklite is transparent, colorless, luster vitreous.
The cleavage is {001} perfect. The mineral is brittle; Mohs' hardness 2½. D_{calc} is 2.797 g/cm³. Stek-
lite is optically uniaxial (+), $\omega = 1.546(2)$, $\epsilon = 1.533(3)$. The chemical composition (electron-microprobe
data) is: Na₂O 0.09, K₂O 18.12, CaO 0.08, MnO 0.03, Fe₂O₃ 2.02, Al₂O₃ 18.18, SO₃ 61.80, total 100.37
wt %. The empirical formula calculated on the basis of 8 O apfu is: $(K_{0.997}Na_{0.003}Ca_{0.004})_{\Sigma 1.009}$
 $(Al_{0.925}Fe_{0.066}Mg_{0.003}Mn_{0.001})_{\Sigma 0.995}S_{2.001}O_8$. Steklite is trigonal, space group $P\bar{3}21$, $a = 4.7281(3)$,
 $c = 7.9936(5)$ Å, $V = 154.76(17)$ Å³, Z = 1. The strongest reflections of the X-ray powder pattern
(d , Å—[hkl]) are: 8.02—34[001]; 4.085—11[100]; 3.649—100[011, 101]; 2.861—51[012, 102];
2.660—19[003], 2.364—25[110], 2.267—14[111, 111, 103], 1.822—12[022, 202]. In the steklite structure
(studied for a microtinned crystal, $R = 0.0732$), the SO_4 tetrahedral anions share corners with distorted
AlO₆ regional prisms to form $2_{-}[(Al,Fe)(SO_4)_2]$ layers coplanar to (001), the K⁺ cations are located in the
interlayer space. The type specimen of steklite from Tolbachik is deposited in the Fersman Mineralogical
Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

Key words: steklite, new mineral species, sulphate, crystal structure, fumaroles sublimate, Tolbachik
volcano, Kamchatka

ВВЕДЕНИЕ

Тригональный сульфат калия и алюминия $KAl(SO_4)_2$ давно и хорошо известен как
синтетическое соединение под названием «жженные квасцы», или «безводные квас-
цы». Он широко применяется в различных областях химической промышленности, в
медицине как косметическое средство. Кристаллическая структура этого тригональ-
ного сульфата решена более 40 лет назад (Manoli et al., 1970).

В природе аналогичная фаза впервые была зафиксирована в вулканических экста-
ляциях на современном лавовом куполе Шованинзан, Хоккайдо, Япония (Mizutani,
1962). Позже она отмечалась в возгонах фумарол двух активных вулканов Централь-
ной Америки — Исалько в Сальвадоре и Сантьяго в Гватемале (Stoiber, Rose, 1974).
Минералогической характеристики этого сульфата в обих цитированных публика-
циях не приводилось, лишь отмечалось, что по порошковой рентгенограмме он соот-
ветствует синтетическому $KAl(SO_4)_2$ с параметрами тригональной ячейки $a = 4.70$,
 $c = 7.96$ Å, фигурирующему в картотеке ASTM под номером 3-337.

В качестве минералоподобной фазы это соединение было кратко охарактеризова-
но в составе высокотемпературных продуктов угольных пожаров на антрацитовых
месторождениях Восточной Пенсильвании, США (Lapham et al., 1980). В 1991 году
его обнаружил Б. В. Чесноков в подобной обстановке на горстом терриконсе шахты
№ 47 в Конейске на Южном Урале. По данным качественного электронно-зондового
анализа и порошковой рентгенограмме было установлено, что это аналог синтетиче-
ского тригонального $KAl(SO_4)_2$. Для конейского образца были также определены по-
казатели преломления, получен КР-спектр, изучены некоторые другие физические, а
также химические свойства. Б. В. Чесноков с соавторами назвал эту фазу стеклитом,
от русского слова «стекло», поскольку ее бесцветные прозрачные хрупкие пластинча-

тые кристаллы очень похожи на тонкие стеклянные пластинки. Копейский стеклит образует гексагональные или тригональные пластинчатые кристаллы до 0,5 мм в поперечнике и до сотых долей миллиметра в толщину, паросные вместе с ангидритом и неидентифицированным безводным сульфатом K, Fe и Al на поверхность кусков аргиллита, оплавленных и спеченных в результате горения бурого угля в терриконе. Температурный интервал формирования стеклита оценен как 600—750 °С (Чесноков и др., 1995).

В соответствии с правилами, принятыми в начале 1990-х годов Международной минералогической ассоциацией (ММА), вещества, возникшие в результате хозяйственной деятельности человека, искусственные (т. е. полученные намеренно) или техногенные (такие, получить которые не было целью, но они тем не менее образовались как продукты химических процессов, инициированных человеком), не считаются минералами. К таким техногенным продуктам отнесены и фазы, возникшие в результате пожаров на угольных разработках и их отвалах. Таким образом, стеклит не был признан минеральным видом, но его название тем не менее вошло в употребление. Например, в крупнейших базах данных по кристаллическим структурам (ICSD) и порошковым рентгенограммам (JCPDS-ICDD) под названием стеклит фигурирует как техногенный материал из Копейска (ICDD 47-1883), так и синтетический $KAl(SO_4)_2$ (ICSD 6305 и 60170, ICDD 74-0082).

Авторами настоящей статьи аналогичная фаза установлена среди fumarольных возгонов (сублиматов) вулкана Толбачик на Камчатке и подробно изучена. Мы сочли наиболее правильным сохранить название стеклит в знак уважения к авторам первого детального описания, выполненного на техногенном материале.

Эталонный образец стеклита с Толбачика, голотип этого минерального вида, передан в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН в Москве, регистрационный № 41091.

УСЛОВИЯ НАХОЖДЕНИЯ И ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКА

Стеклит найден в выгонах fumarола Ядовитая на Втором шлаковом конусе (ВШК) северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) 1975—1976 гг. Шлаковые конуса БТТИ, возникшие к югу от вулкана Толбачик (Большое..., 1984), по сей день проявляют значительную fumarольную активность. В их верхних частях наблюдаются выходы газов с температурой до 480 °С (данные на 2010 г.). Fumarольные газы здесь, по данным одного из авторов (М. Е. Зл., более чем на 99 % состоят из воздуха, а оставшаяся часть представлена водяным паром и кислотными компонентами, в первую очередь CO_2 , HCl и HF . Также, по-видимому, в этих газах содержится небольшое количество летучих соединений металлов. Второй шлаковый конус Северного прорыва имеет объем около 0,1 км³ и высоту 300 м. Здесь сосредоточено наибольшее количество интересных проявлений fumarольной минерализации. Характеристика эвсталяционных минералов Толбачика дана в целом ряде работ, в первую очередь Л. П. Вергасовой и соавторами, многие годы посвятивших исследованию этих объектов и открывших здесь почти 30 новых минералов. Базовые данные по минералогии и генетическим особенностям fumarольных сублиматов Толбачика собраны в обзорной статье (Вергасова, Филатов, 1993).

Fumarола Ядовитая — не только самый яркий в минералогическом отношении объект Толбачика, но и вообще одно из наиболее богатых проявлений эвсталяционной поствулканической минерализации в мире, выделяющееся очень широким разнообразием минералов. В ее выгонах и продуктах их низкотемпературного изменения на нынешний день установлено 55 минеральных видов, всего же в fumarолах Второго шлакового конуса найдено уже более 100 минералов. Fumarола Ядовитая представляет собой открытую полость шириной 1,5 м и глубиной около 2 м. Ее стенки покрыты толстыми корками сублиматов, частично выветрелых и измененных метеорными водами. Температура в глубине полости продолжает оставаться высокой — до 340 °С

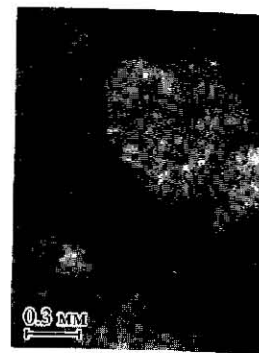


Рис. 1. Агрегаты стеклита (а) и сферулитов (б) — на кристаллической корке.

Fig. 1. Steklyte aggregates on spherulites, b — crystal crust.

(2010 г.), температуры, число и содержащей стеклит и соавторы описывают температуру, как 150—170 °С.

Образцы со стеклитом извлекаются в небольшом количестве (длиной от 1 мм до 1 см) из fumarола. Главный цвет — от светло-зеленого до желтого. Своим геометрическим строением химически $K_2Cu_2(OH)_2SO_4$. В основном-коричневатый халькоид и халькантит. В ассоциации $KCu_2(OH)_2SO_4$ и Cl и чаше всего гнезда (до 10 см кристаллов, алюмохлориды стеклита, а также и зернистые агрегаты к сульфатам, в этой ассоциации чаше всего агрегаты нотаалита Cu_2OCl_2 и те $K_2Cu_2(OH)_2Cl \cdot H_2O$ и белом виде мелких красных кристаллов разовидности (кювевкит).

Кристаллы толбачинского стеклита встречаются его многого И те и другие очень тонкие достигают 0,2 м — шнакоид {001}. Б. положительно это {100} и ружено микродвойников

тинки. Копейский стеклит кристаллы до 0,5 мм в поше вместе с ангидритом и на поверхность кусков ар- бурого угля и террикоме. как 600—750 °С (Чесноков

0-х годов Международной шие в результате хозяйст- ленные намеренно) ити же они тем не менее образова- х человеком), не считают- и фазы, возникшие в ре- Таким образом, стеклит не менее вошло в употребле- еским структурам (ICSD) и ем стеклит фигурирует как 1 синтетический $KAl(SO_4)_2$

всна среди fumarольных дробно изучена. Мы сочли важения к авторам первого риале.

о минерального вида, пере- Москва, регистрационный

Литература

ред. в. Иванов. 2000 г. о извержения ГТТН от вулкана Плоский Толбачику fumarольную актив- температурой до 480 °С (дан- из авторов (М.Е.З.), более лавлена водяным паром и HF. Также, по-видимому, в динений металлов. Второй 1 км² и высоту 300 м. Здесь лений fumarольной мине- лбачика дана в целом ряде многие годы посвятивших новых минералов. Базовые арольных сублиматов Тол- 993).

ералогическом отношении с проявлений экагацион- еется очень широким разно- гелспературного изменения го же в fumarолах Второго рола Ядовитая представля- ло 2 м. Ее стенки покрыты мененных метеорными во- гься высокой — до 340 °С

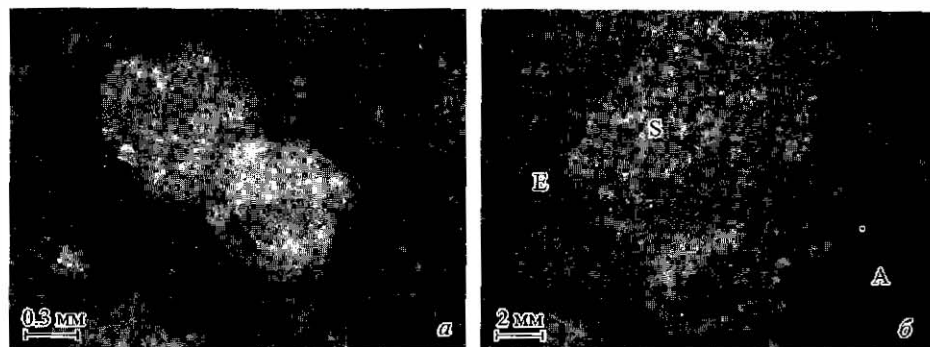


Рис. 1. Агрегаты стеклита на вулканической корочке (фумарола Ядовитая, Толбачик).

а — сросток сферулитов, б — кристаллическая корочка. S — стеклит, А — алюмосульфат, Е — эвхлорин. Фото: И. В. Пекков и А. В. Касаткин

Fig. 1. Steklite aggregates on volcanic scoria (fumarole Yadvovitaya — «Poisonous», Tolbachik): a — cluster of spherulites, b — crystal crust. S — steklite, A — alumosulfate, E — evhalorin. Photographs: I. V. Pekkov and A. V. Kasatkin.

(2010 г.), температуры же образования конкретных минеральных ассоциаций, в том числе и содержащей стеклит, с достаточной точностью не установлены. Е. Ю. Быкова и соавторы оценивают температуру газов, которые формируют сульфатную минерализацию, как 150—170 °С (Быкова et al., 1998).

Образцы составили собраны авторами (М.Е.З. и М.Е.З.) в 2008—2010 гг. Этой агрегат в небо-плоско-обосе прикут, имеет в составе существенно сульфатных карок доминирующей фазой, а также в поше, покрывающих одну из стенок по- ла fumarола, с пиния минералов, таких как эвхлорин $KNaCu_2O_2SO_4$, ярко-зеле- ный до темно-зеленого цвета. Поверхность его арратов сложена сетками таблича- ных или субометрических кристаллов разной степени совершенства, на которые на- расставит итикаетические каймы или же самостоятельные ярко-зеленые пластинчатые кристаллы минералов с структурой радиально-эвхлорину фелатовита $K_2Cu_2O_2SO_4$. В основании этих карок обычно присутствует бесцветный или блед- но-коричневый магнезианит $CuSO_4$, легко и темнеющий при комнатных услови- ях в халканит. В ассоциации с фелатовитом отмечены единичные кристаллы кам- чатита $KCu_2O_2(SO_4)Cl$ и вилсовита $KCu_2Fe^{3+}V^{5+}O_4(SO_4)Cl$. Среди эвхлорина встре- чаются гнезда (до 10 см и даже более) темно-зеленых до почти черных игольчатых кристаллов алюмосульфата $K_2Cu_2AlO_2(SO_4)_2$, с которыми тесно связаны обо- собления стеклита, а также бесцветные тетраэдрические кристаллы, округлые индиви- ды и зернистые агрегаты лангбейнита $KMg_2(SO_4)_3$. Из минералов, не относящихся к сульфатам, в этой ассоциации достаточно широко распространен гематит в виде тонкоочешуйчатых агрегатов красного цвета, встречены единичные кристаллы мелан- ногаллита Cu_2OCl_2 и тенорита CuO , небольшие скопления поздних авдонинита $K_2Cu_2(OH)_2Cl \cdot H_2O$ и белонита $Cu(OH)Cl$. Отметим также ванадаты, нарастающие в виде мелких красных кристаллов на сульфаты: низит $Cu_2V_2O_7$ (на эвхлорине) и высо- комедистую разновидность зинонита $Cu_{1-x}(Fe^{3+},Cu)_4(VO_4)_6$ (как правило, на алюмо- клочевектите).

Кристаллы толбачицкого стеклита — гексагональные пластинки, чаще же здесь встречаются его многоугольные, неправильной формы, пластинчатые индивиды. И те и другие очень тонкие, обычно 5—10 мкм, редко до 30 мкм толщиной, а в попе- речнике достигают 0,2 мм, крайне редко 1 мм. Главная габитусная форма кристал- лов — пинакоид $\{001\}$. Боковые грани пластинок проиндентировать не удалось, пред- положительно это $\{100\}$ и/или $\{110\}$. При структурном исследовании минерала обна- ружено микродвойникование (см. ниже). Индивиды стеклита зачастую в разной

степени расщеплены, иногда напоминают открытую книгу. Они собраны в ажурные агрегаты неправильной, реже сферической (рис. 1, а) формы. Иногда стеклит формирует, как правило, вместе с эвхлорином, алюмоключевскитом, лангбейнитом и гематитом, тонкие корочки площадью до 1.5×2.5 см на поверхности вулканического шлака (рис. 1, б).

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Стеклит с Толбачика прозрачный, бесцветный, в агрегатах белый до серовато-белого. Черта белая, блеск стеклянный. В ультрафиолетовых и катодных лучах минерал не люминесцирует. Спайность совершенная по {001}, излом листоватый. Стеклит хрупкий, а очень тонкие листочки гибки. Твердость по шкале Мооса 2½. Попытки измерить плотность минерала методом уравнивания в тяжелых жидкостях не дали удовлетворительного результата по причине ажурного характера агрегатов. Вычисленная плотность 2.792 г/см³.

Стеклит оптически одноосный отрицательный, $n_o = 1.546(2)$, $n_e = 1.533(3)$. Под микроскопом он бесцветен.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химический состав толбачинского стеклита определен с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-6480LV, оснащенного энергодисперсионным спектрометром INCA-Energy 350 (окно ATW-2). Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1 нА, диаметр зонда — 3 мкм. Эталонь: альбит — Na; Al; ортоклаз — K; MgF₂ — Mg; анортит — Ca; металлический Mn — Mn; оливин — Fe; BaSO₄ — S.

Средний по результатам 5 электронно-зондовых анализов (в скобках — разброс значений) химический состав стеклита: Na₂O 0.09 (0.04—0.17), K₂O 18.12 (17.6—18.9), CaO 0.08 (0.03—0.18), MnO 0.03 (0.00—0.09), Fe₂O₃ 2.02 (1.6—2.5), Al₂O₃ 18.18 (17.4—19.3), SO₃ 61.80 (60.6—62.6), сумма 100.37 мас. %. Содержания остальных элементов с атомными номерами 8 оказались ниже пределов обнаружения электронно-зондовым методом.

Эмпирическая формула стеклита, рассчитанная на 8 атомов O, такова: $(K_{0.967}Na_{0.008}Ca_{0.094})_{\Sigma 1.069}(Al_{0.925}Fe_{0.066}Mg_{0.003}Mn_{0.001})_{\Sigma 1.995}S_{2.001}O_8$. Упрощенная формула: $KAl(SO_4)_2$, отвечающие ей содержания компонентов: K₂O 18.24, Al₂O₃ 19.74, SO₃ 62.02, сумма 100.00 мас. %.

Индекс схожести состава и свойств, рассчитанный по уравнению Гладстона—Дейла, составляет 0.005 (*superior*).

РЕНТГЕНОВСКИЕ ДАННЫЕ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Порошковая рентгенограмма стеклита с Толбачика (табл. 1) получена методом Гандольфи на монокристалльном дифрактометре STOE IPDS II ($Mo_{K\alpha}$ -излучение, расстояние от образца до IP-детектора 200 мм). По ней наш минерал весьма близок к стеклиту из Копейска (Чеснок и др., 1995) и синтетическому $KAl(SO_4)_2$ (ICDD 74-0082). Рассчитанные из порошкограммы параметры гексагональной (тригональной) ячейки: $a = 4.728(3)$, $c = 8.001(6)$ Å, $V = 154.9(3)$ Å³.

Монокристалльное рентгеновское исследование толбачинского стеклита выполнено на дифрактометре Bruker SMART APEX CCD. Минерал тригональный, пространственная группа $P321$, $a = 4.7281(3)$, $c = 7.9936(5)$ Å, $V = 154.76(17)$ Å³, $Z = 1$. Изученный кристалл оказался микросдвойникованным. Учет матрицы двойникования по плоскости (001) [100/010/001] привел к понижению величины R-фактора с 22 до 7.3 %. Структура толбачинского стеклита решена прямыми методами и уточнена на

Результаты ра

X-ray

$I_{изм.}$	$d_{изм.}$	$I_{выс.}$
34	8.02	6
11	4.085	12
100	3.649	100,99
51	2.861	29,12
19	2.660	11
25	2.364	37
14	2.267	2,2,2
10	2.034	1,1,1
3	1.983	5,3
12	1.822	6,2
9	1.800	2,13
2	1.629	2
3	1.610	3
9	1.522	2,2,1,1
2	1.484	3,1
7	1.442	1,1,1,1
5	1.432	4
6	1.365	4
3	1.326	3,3
2	1.266	5,1
3	1.223	1,1
2	1.183	1
2	1.118	2

Примечание. В вычислении $d_{изм.}$ использованы данные монокристалла

базе 408 независимых от данных монокристалльно

ны в табл. 2, а координат в структуре стеклита рода: координационный тригональной призмы к относительно нижнего с нальной призме — 0°). F составляет $Al_{0.89(3)}Fe_{0.11(3)}$. Атомы S находятся в тетраэдрической координации с длиной связи 1.471 Å, что меньше, чем ранее для природного $S—O(2)$ для мостиковых рами AlO_4 (1.479 Å), замещенных. Один симметрично незаполненный координационный кубооктаэдр (рис. 2, в, г).

В структурном отношении $KAl(SO_4)_2$, изученного в данном исследовании, минерала (рис. 2, а) тетраэдрические полиэдры AlO_4 образуют тетраэдрические полиэдры (001) (рис. 2, б). Анионный

Результаты расчета порошковой рентгенограммы стеклита с Толбачика

X-ray powder diffraction data for steklite from Tolbachik

$I_{\text{эм}}$	$d_{\text{эм}}$	$I_{\text{выч.}}^*$	$d_{\text{выч.}}^{**}$	hkl
34	8.02	6	7.994	001
11	4.085	12	4.095	100
100	3.649	100,99	3.644, 3.644	011, 101
51	2.861	29, 12	2.860, 2.860	012, 102
19	2.660	11	2.665	003
25	2.364	37	2.364	110
14	2.267	2, 2, 2	2.267, 2.267, 2.233	111, 111̄, 103
10	2.034	1, 1, 1	2.047, 2.035, 2.035	200, 112, 112̄
3	1.983	5, 3	1.983, 1.983	021, 201
12	1.822	6, 2	1.822, 1.822	022, 202
9	1.800	2, 13	1.796, 1.796	014, 104
2	1.629	2	1.623	023
3	1.610	3	1.599	005
9	1.522	2, 2, 1, 1, 1, 1	1.526, 1.526, 1.519, 1.519, 1.519, 1.519	114, 114̄, 121, 121̄, 211, 211̄
2	1.484	3, 1	1.489, 1.489	015, 105
7	1.442	1, 1, 1, 1	1.443, 1.443, 1.443, 1.443	122, 122̄, 212, 212̄
5	1.432	4	1.430	024
6	1.365	4	1.365	300
3	1.326	3, 3	1.324, 1.324	115, 115
2	1.266	5, 1	1.267, 1.267	016, 106
3	1.223	1, 1	1.224, 1.224	114, 124
2	1.183	1	1.182	220
2	1.128	2	1.117	200

* Иллюстрация. В вычисленной порошковой рентгенограмме использованы только рефлексы с интенсивностью $I_{\text{эм}} \geq 1$. Значения $d_{\text{эм}}$ рассчитаны с помощью программы $d_{\text{эм}}$.

у. Они собраны в ажурные
ты. Иногда стеклит форми-
том, лангбейнитом и гема-
ности вулканического шла-

ХАРАКТЕРИСТИКИ

атах белый до серовато-бе-
и катодных лучах минерал
злом листоватый. Стеклит
але Мооса 2½. Попытки из-
жидкостях не дали
рактера агрегатов. Вычис-

.546(2), $n_c = 1.533(3)$. Под

с помощью сканирующего
ого энергодисперсионным
щес напряжение 20 кВ, ток
. Al: ортоклаз — K; MgF₂ —
Fe; BaSO₄ — S.

изов (в скобках — разброс
(0.04—0.17), K₂O 18.12
Fe₂O₃ 2.02 (1.6—2.5), Al₂O₃
кас. %. Содержания осталь-
делов обнаружения элект-

на 8 атомов ●, такова:
1O₈ Упрощенная формула:
2O 18.24, Al₂O₃ 19.74, SO₃

ий по уравнению Гладсто-

СТРУКТУРА

табл. 1) получена методом
DS II (Mo_{Kα}-излучение, рас-
и минерал весьма близок к
ическому KAl(SO₄)₂ (ICDD
гексагональной (тригональ-

инского стеклита вышеле-
л тригональный, простран-
54.76(17) Å³, Z = 1. Изуче-
иатрицы двойникования по
личины R-фактора с 22 до
ми методами и уточнена на

базе 408 независимых отражений с $I > 2\sigma(I)$. Кристаллографические характеристики,
данные монокристалльного эксперимента и параметры уточнения структуры приведе-
ны в табл. 2, а координаты, тепловые параметры атомов и длины связей — в табл. 3.

В структуре стеклита катион Al³⁺ имеет шестерную координацию из атомов кисло-
рода: координационный полиэдр можно представить в виде переходной формы от
тригональной призмы к октаэдру. Угол поворота верхнего треугольного основания
относительно нижнего составляет около 10° (в октаэдре он составил бы 30°, в триго-
нальной призме — 0°). Найденная из структурных данных заселенность позиции Al
составляет Al_{0.99(5)}Fe_{0.11(3)}, что коррелирует с данными электронно-зондового анализа.
Атомы S находятся в тетраэдрической координации из атомов кислорода со средней
длиной связи 1.471 Å, что вполне согласуется со средней величиной 1.473 Å, рассчи-
танной ранее для природных сульфатов (Hawthorne et al., 2000). При этом расстояния
S—O(2) для мостиковых атомов O(2), связывающих сульфатные тетраэдры с полиэ-
драми AlO₆ (1.479 Å), заметно короче, чем S—O(1) для концевых атомов O(1) (1.448 Å).
●дин симметрично независимый атом калия окружен девятью атомами кислорода,
образуя координационный многогранник, который можно описать как искаженный
кубооктаэдр (рис. 2, в, г).

В структурном отношении стеклит — природный аналог синтетического
KAl(SO₄)₂, изученного Дж. М. Маноли с соавторами (Manoli et al., 1970). В структуре
минерала (рис. 2, а) тетраэдры SO₄ сочленены мостиковыми атомами кислорода O(2)
с полиэдрами AlO₆, образуя двумерные слои $\frac{1}{2}[Al(SO_4)_2]_2$, компланарные плоскости
(001) (рис. 2, б). Анионные слои соединяются между собой через катионы K⁺, распо-

Кристаллографические данные и параметры уточнения
кристаллической структуры стеклита

Crystallographic data and parameters of the steklite crystal structure refinement

Кристаллографические параметры	
Температура	293 К
Излучение и длина волны	$MoK\alpha$, 0.71073 Å
Симметрия	Тригональная
Пространственная группа	$R\bar{3}12$
Параметры элементарной ячейки a, c (Å)	4.7281(3), 7.9936(5)
Объем элементарной ячейки (Å ³)	154.76(2)
Z	1
$D_{\text{теор}}$ (г/см ³ ; из структурных данных)	2.805
Коэффициент поглощения (мм ⁻¹)	1.914
Размеры кристалла (мм ³)	0.10×0.10×0.02
Сбор данных	
Диапазон углов θ	2.55—35.86°
Диапазон значений h, k, l	6 → 7, 6 → 7, 9 → 12
Всего рефлексов	1135
Всего независимых рефлексов (R_{int})	467(0.115)
Независимых рефлексов с $F > 4\sigma(F)$	408
Параметры уточнения структуры	
Метод уточнения	Полноматричный МНК по F^2
Коэффициенты весовой схемы w	0.0739, 0.9254
Коэффициент жесткости	0.09(5)
Данные фиксированные параметры уточняемые параметры	467 0.73
$R_1 = \sum F_o - F_c / \sum F_o$	0.071, 0.192
$wR_2 = \sqrt{\sum w(F_o - F_c)^2} / \sum w F_o^2$	0.079, 0.190
χ^2	1.234
Максимальный и минимальный отклонения на разностной карте электронной плотности, е. Å ⁻³	1.392, -2.060

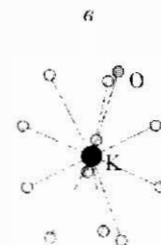
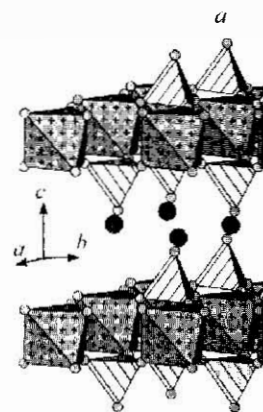


Рис. 2. Общий вид кристаллической структуры $[Al, Fe]SO_4 \cdot 1/2 H_2O$, координация К в бинг-топологии интер-полиэдров

Координация

Fig. 2. General view of the crystal structure of $[Al, Fe]SO_4 \cdot 1/2 H_2O$, coordination of K in bing topology of inter-polyhedra

Таблица 3

Координаты и эквивалентные параметры смещений атомов (U_{eq} , Å²)
в структуре стеклита с Толбачика

Coordinates and equivalent parameters of displacement of atoms (U_{eq} , Å²)
in crystal structure of steklite from Tolbachik

Атом	x	y	z	U_{eq}
Al	0	0	0	0.0082(11)
S	3/4	1/3	0.7963(3)	0.0085(5)
K	0	0	1/2	0.0225(8)
O(1)	0.75	1/3	0.6152(10)	0.0178(14)
O(2)	0.3487(11)	0.2782(12)	0.8592(7)	0.0138(10)

Длины связей: Al—O(2) = 1.883 Å (6×), S—O(1) = 1.448(8) Å, S—O(2) = 1.479(5); Al(3×)—O(1) = 2.881(3) Å (6×), K—O(2) = 3.244(5) Å (6×)

Примечание. Заселенность позиции Al = $Al_{0.89(3)}Fe_{0.11(3)}$

лагающиеся в межслоистую структуру, выраженная в расщеплении о KAl(SC

ского стеклита не обнаружены. Топология алюминию двумерного графа, изоб

руют соответственно по ре стеклита идентичен (1971; Anthony et al., 1971, 1998). Анионными слоями группами синтетическими

Б. В. Чесноков и соавт. указали на изоморфизм стеклита и годовиковиты: что кристаллическая структура сомнений: судя по химический аналог без желе

Таблица 2

описания

structure refinement

293 K
$k_{\text{ref}} = 0.71073 \text{ \AA}$
тригональная
$R\bar{3}12$
$a(113), 7.9936(5)$
$c(154.76(2))$
1
2.805
1.914
$0 \times 0.10 \times 0.02$
55 35.86°
$2\theta = 7, 9 \rightarrow 12$
1135
$167(0.115)$
408
ричный МНК по F^2
$1739, 0.9254$
0.09(5)
$467, 0.25$
0.73, 0.92
$0.79, 0.19$
0.234
392, 2.666

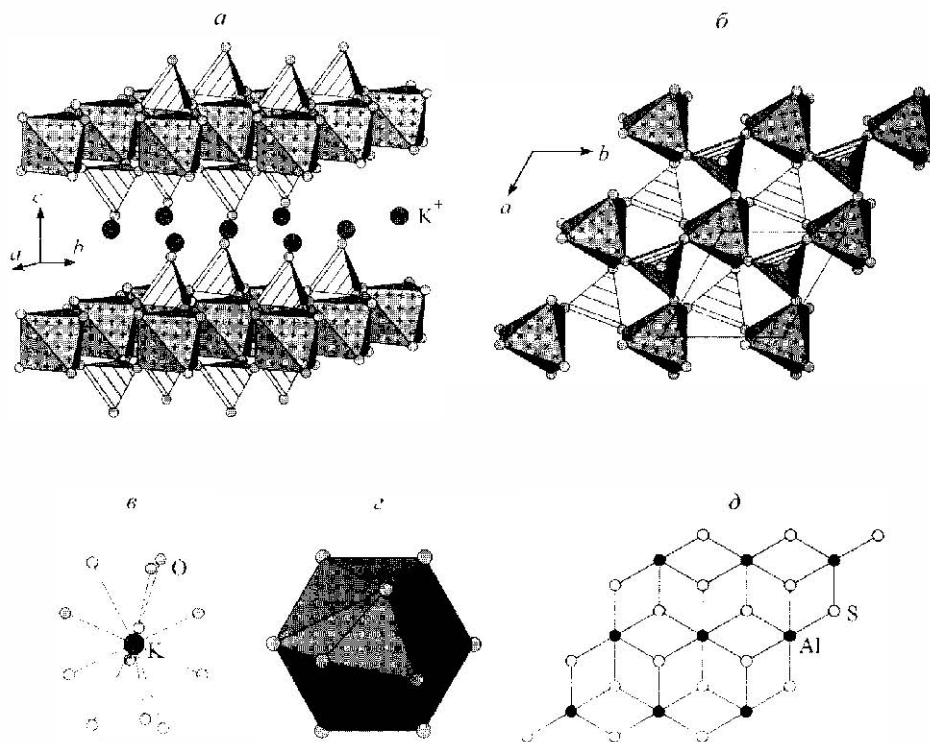


Рис. 2. Общий вид кристаллической структуры стеклита с Толбачика (а), строение слоя $[(\text{Al, Fe})(\text{SO}_4)_2]$ (б), координационный полиэдр атома К в шариковом (с) и полиэдрическом (с') изображениях, черно-белый граф, описывающий топологию объединения координационных полиэдров Al и S (д)

Координационные полиэдры Al размечены крестиками, тетраэдры SO_4 разномысли

Fig. 2. General view of the crystal structure of steklite from Tolbachik (a), structure of the $[(\text{Al, Fe})(\text{SO}_4)_2]$ layer (b), coordination of K in ball-like (c) and polyhedral (c') representations, black-and-white graph describing topology of inter-polyhedral linkage in steklite (d). Al polyhedra are cross-hatched, S polyhedra — lined.

Таблица 3

атомов ($U_{\text{eq}}, \text{\AA}^2$)f atoms ($U_{\text{eq}}, \text{\AA}^2$)

ik

U_{eq}	
●●082(11)	
0.0085(5)	
0.0225(8)	
0.0178(14)	
0.0138(10)	

 $D(2) = 1.479(5) \text{ \AA} (3 \times)$

(6×)

лагаются в межслоевом пространстве. Отметим, что структурная разупорядоченность, выраженная в развороте полиэдров AlO_6 соседних слоев, зафиксированная для синтетического $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ Д. В. Уэстом с соавторами (West et al., 2008), у толбачинского стеклита не обнаружена.

Топология алюмосульфатного слоя в стеклите может быть описана при помощи двумерного графа, изображенного на рис. 2, d (черные и белые вершины символизируют соответственно полиэдры Al и S). По своей топологии слой $[\text{Al}(\text{SO}_4)_2]$ в структуре стеклита идентичен слоям $[\text{Fe}(\text{SO}_4)_2]$ у явапайита $\text{KFe}(\text{SO}_4)_2$ (Graeber, Rosenzweig, 1971; Anthony et al., 1972) и $[\text{Mg}(\text{PO}_4)_2]$ у брайанита $\text{Na}_2\text{CaMg}(\text{PO}_4)_2$ (Alkmpfer, Fuess, 1998). Анионными слоями такой топологии, но разного состава обладает также большая группа синтетических соединений (Krivovichev, 2008).

Б. В. Чесноков и соавторы (1995), базирясь на порошковых рентгеновских данных, указали на изоструктурность двух минералов из горелых отвалов Конейска: стеклита и годовиковита $(\text{NH}_4)(\text{Al, Fe}^{3+})(\text{SO}_4)_2$ (Цсрбакова и др., 1988). Несмотря на то что кристаллическая структура последнего до сих пор не изучена, этот вывод не вызывает сомнений: судя по стехиометрии и порошкограммам, годовиковит и его синтетический аналог без железа $(\text{NH}_4)\text{Al}(\text{SO}_4)_2$ (ICDD 23-0001) изоструктурны стеклиту.

Авторы благодарны Е. П. Щербаковой за обсуждение материала. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-05-00397-а) и программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт 16.740.11.0490).

Список литературы

- Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975—1976 (ред. С. А. Федотов). М.: Наука, 1984. 637 с.
- Вергасова Л. П., Филатов С. К. Минералы вулканических эксталяний — особая генетическая группа (по материалам Толбачинского извержения 1975—1976 гг.) // ЗВМО. 1993. Вып. 4. С. 68—76.
- Чеслоков Б. В., Баженова Л. Ф., Бушмакин А. Ф., Катляров В. А., Белозуб Е. В., Вилисов В. А., Кловен А. Ю. Новые минералы из горных отвалов Челябинского угольного бассейна (сообщение: седьмое) // Уральский минералогический сборник. № 4. Миасс, 1995. С. 3—28.
- Щербакова Е. П., Баженова Л. Ф., Чеслоков Б. В. Годовиковит $\text{Ni}_{14}(\text{Al}, \text{Fe})(\text{SO}_4)_2$ — новый аммонийсодержащий сульфат // ЗВМО. 1988. Вып. 2. С. 208—211.
- Alkemper J., Fuess H. The crystal structures of NaMgPO_4 , $\text{Na}_2\text{CaMg}(\text{PO}_4)_2$ and $\text{Na}_{18}\text{Ca}_{13}\text{Mg}_5(\text{PO}_4)_{18}$; new examples for glaserite related structures // Zeit. Kristallogr. 1998. Vol. 213. P. 282—287.
- Anthony J. W., McLean W. J., Laughon R. B. The crystal structure of yavapaiite: a discussion // Amer. Miner. 1972. Vol. 57. P. 1546—1549.
- Vykova E. Y., Berlepsch P., Kartashov P. M., Buegger J., Armbruster T., Criddle A. J. Vergasovaitе $\text{Cu}_3\text{O}[(\text{Mo}, \text{S})\text{O}_4][\text{SO}_4]$, a new copper-oxy-molybdate-sulfate from Kamchatka // Schweiz. Miner. Petrogr. 1998. Vol. 78. P. 479—488.
- Groeber E. J., Rosenzweig A. The crystal structures of yavapaiite, $\text{KFe}(\text{SO}_4)_2$, and goldichite, $\text{KFe}(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_4$ // Amer. Miner. 1971. Vol. 56. P. 1917—1933.
- Hawthorne F. C., Krivovichev S. V., Burns P. C. Crystal chemistry of sulfate minerals // Rev. Miner. Geochem. 2000. Vol. 40. P. 1—112.
- Krivovichev S. V. Structural Crystallography of Inorganic Oxysalts. Oxford University Press, Oxford, 2008. 303 p.
- Lapham D. M., Barns J. H., Downey W. Jr., Finkelman R. B. Mineralogy associated with burning anthracite deposits of Eastern Pennsylvania // Reports of the Commonwealth of Pennsylvania. Dept. of Environmental Resources, Bureau of Topographic and Geologic Survey, Mineral Resources, 1980. Vol. 38. 82 p.
- Manotti J. M., Pierpi P., Pannetier G. Structure cristalline du sulfate double d'aluminium et de potassium // Bull. Soc. Chim. de France. 1970. P. 98—101.
- Merzhan Y. Volcanic sublimates and incrustations from Showashinzan // J. Earth Sci. Nagoya Univ. 1962. Vol. 10. P. 135—148.
- Stoiber R. E., Rose W. I., Jr. Fumarole incrustations at active Central American volcanoes // Canadian Cosmochem. Acta. 1974. Vol. 38(4). P. 495—516.
- West D. V., Huang Q., Zandbergen H. W., McQueen T. M., Cava R. J. Structural disorder, octahedral coordination and two-dimensional ferromagnetism in anhydrous alums // J. Solid State Chem. 2008. Vol. 181. P. 2768—2775.

Получена в редакцию
15 февраля 2012 г.

УДК 549.9

КС

Санкт-Петербургская
кафедра кристалл

Мы на пороге столетия, г
ния. Явление дифракции ре
исслед за этим, в 1913 г. теор
лучно равнине и позволило
жения с гали вкладом в форми
ном оказалось кристаллическ
манья об этом событии ес
сопровождали.

Ключевые слова: столетие
рентгеновских лучей, периоды

С. К. ФИЛАТОВ ТО I

We are at the edge of the c
phenomenon of X-ray diffracti
basement of the X-ray-diffracti
wed immediately the decipherin
to appearance of the concept of
Thus the XX century started
complemented by references on

Key words: centennial anni
odicity of crystal structures, ato

В 1912 году была откр
же были созданы теорети
ния вещества, который уз
в истории человечества в
плно концепции атомарнс
таллическим. Так наступ

Упомянутые этапы р
формация о дифракции не
ющихся сопутствующих
колению естествоиспыт
которых прежде всего и с
пывающие сведения о рас

ске (Fifty Years of X-Ray I
В XIX веке сформиро
жения атомов в кристалл