

УДК 629.7:067:537.2:621.38

## ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОТРЕЩИН НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА, ОБЛУЧЕННОГО ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 30 кэВ

© 2020 г. Р. Х. Хасаншин<sup>a, b, \*</sup>, Л. С. Новиков<sup>c</sup>, Д. А. Применко<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Акционерное общество “Композит”, Королев, Московская область, 141070 Россия

<sup>b</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

<sup>c</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: rhkhas@mail.ru

Поступила в редакцию 02.12.2019 г.

После доработки 22.01.2020 г.

Принята к публикации 25.01.2020 г.

Методами атомно-силовой микроскопии исследованы структурные изменения поверхности образцов стекла К-208, облученных протонами с энергией 20 и 30 кэВ в вакууме ( $10^{-4}$  Па). Установлено, что на поверхности стекла К-208, облученного протонами с энергией 30 кэВ при плотности потока  $\varphi_p = 4.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и флуенсах  $\Phi_p = (1.1 \times 10^{15} - 6.6 \times 10^{15}) \text{ см}^{-2}$ , образуются микротрещины, размеры которых растут с увеличением флуенса. Авторы полагают, что образование микротрещин обусловлено: появлением в поверхностном слое растягивающих напряжений в результате перестройки микроструктуры стекла, вызванной миграцией ионов натрия в поле внедренного заряда; формированием газонаполненных пузырьков; переносом массы к облучаемой поверхности и, возможно, выходом к облучаемой поверхности перколяционных каналов натрия и кислорода. Показано, что при тех же значениях  $\varphi_p$  и  $\Phi_p$  облучение стекла К-208 протонами с энергией 20 кэВ не приводит к образованию микротрещин.

**Ключевые слова:** протонное облучение, стекло К-208, уплотнение стекла, атомно-силовая микроскопия, микротрещина, структура поверхности, полевая миграция ионов, газонаполненные пузырьки.

DOI: 10.31857/S1028096020090113

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время силикатные стекла часто используют в условиях повышенных радиационных нагрузок, обусловленных воздействием потоков заряженных частиц. В качестве примеров могут служить стекла, применяемые в космических аппаратах и подвергающиеся воздействию неэкранированного космического излучения [1–3]. Такие стекла используются в различных детекторах, линзах и призмах, а также в качестве защитных покрытий элементов солнечных батарей и терморрадиаторов.

Для придания силикатному стеклу необходимых свойств в его состав вводят оксиды щелочных металлов. Например, добавление оксида натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) снижает температуру варки, ускоряет процесс стеклования и способствует осветлению стекла. Оксид калия ( $\text{K}_2\text{O}$ ) вводят для снижения склонности стекла к кристаллизации, улучшения светопропускания и придания ему блеска. Облучение стекла способно изменить его состав [4–6], морфологию облучаемой поверхности [7–10],

плотность [11–13] и микроструктуру стекла, привести к образованию в нем газонаполненных пузырьков [13–16], к генерации радиационных центров окраски, к аккумулярованию инжектированных зарядов [17, 18], а также сопровождаться другими, часто взаимосвязанными, процессами.

Образование молекулярного кислорода, наблюдаемое в боросиликатных стеклах, облученных как электронами [13–16], так и ионами He [19], Ar [20], Kr [21] и Xe [22], можно объяснить миграцией ионов щелочных металлов ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ ) в поле инжектированного заряда. Их полевая миграция играет ключевую роль в перестройке микроструктуры стекла и высвобождении атомов не мостикового кислорода. В частности, в [13] показано, что облучение электронами с энергией 50 кэВ приводит к уплотнению стекла, содержащего Na и K, во всем исследованном диапазоне значений флуенса от  $1.3 \times 10^{17}$  до  $1.99 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . Установлено, что уплотнению стекла, как и образованию пузырьков с  $\text{O}_2$ , предшествовало перераспределение ионов  $\text{Na}^+$ . Кроме того, превраще-

ние боратов тетрагональной группы ( $\text{BO}_4$ ) в бораты тригональной группы ( $\text{BO}_3$ ) также рассматривается как один из механизмов, приводящих к образованию молекулярного кислорода [23]. Воздействии электронов приводит также к увеличению полимеризации в облучаемом слое стекла, к уменьшению среднего угла связи  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  [15, 16, 24–26]. Основные эффекты электронного и ионного облучения во многом связаны с перераспределением в стеклах ионов щелочных металлов [13–16, 19–26].

Формирование в облучаемом стекле механических напряжений может быть обусловлено неравномерным распределением выделенной в нем энергии воздействующего излучения, перестройкой микроструктуры стекла, образованием газонаполненных пузырьков и так далее. Так, уплотнение приповерхностного слоя стекла под действием заряженных частиц средних энергий может приводить к появлению в нем растягивающих напряжений и, когда они достигают значений, превышающих предел прочности стекла, происходит его растрескивание. В [27, 28] исследовано образование трещин в поверхностных слоях натрий-силикатного стекла под действием мощного ионного пучка. Возникновение трещин и разрушение стекла объясняют наличием в приповерхностной области растягивающих остаточных механических напряжений. Так же трактуют появление трещин на поверхности натриево-известковых стеклянных пластин толщиной 6 мм, облученных протонами с энергией 480 кэВ [29]. В настоящее время в литературе отсутствуют результаты исследований подобных эффектов при воздействии на стекло протонов с энергией, характерной для горячей магнитосферной плазмы.

Таким образом, повреждения, вызванные облучением, могут изменить как физические, так и химические свойства стекла. Понимание роли эффектов облучения в микроструктурной эволюции стекла имеет решающее значение для прогнозирования изменения его характеристик после длительного взаимодействия, например, с окружающей космической плазмой. Бомбардирующие частицы инжектируют в стекло энергию, импульс, заряд, а в случае ионного облучения и ионы атомов. Происходящие при этом изменения структуры стекла часто носят общий характер, и можно ошибочно предположить, что природа радиационно-индуцированных дефектов не зависит от конкретной характеристики излучения. Однако результаты экспериментов, представленные в настоящей работе, показывают, что изменения морфологии стекла К-208 после воздействия протонов с энергией 20 и 30 кэВ при одинаковых интенсивностях, длительности и условиях облучения могут принципиально отличаться. Эти результаты, не упоминавшиеся до на-

стоящего времени в литературе, очень важны для прогнозирования стойкости защитных стекол космических аппаратов к воздействию горячей магнитосферной плазмы.

При испытаниях диэлектрических материалов внешних поверхностей высокоорбитальных спутников на стойкость к факторам электростатических разрядов, обусловленных действием горячей магнитосферной плазмы, образцы материалов подвергают электронно-протонному облучению с энергией частиц  $E_e = 15$  кэВ и  $E_p = 30$  кэВ. Для интерпретации результатов воздействия такой модельной плазмы необходимо изучить эффекты воздействия на материал ее отдельных компонентов.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах в качестве образцов использовали защитные покрытия солнечных батарей космических аппаратов – стеклянные пластины размерами  $40 \times 40 \times 0.17$  мм. Исследуемое стекло К-208 имеет следующий состав:  $\text{SiO}_2$  – 69.49;  $\text{B}_2\text{O}_3$  – 11.93;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 4.00;  $\text{K}_2\text{O}$  – 4.25;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 10.33;  $\text{CeO}_2$  – 2.00 мол. % (сверх 100%). Пластины нарезают из ленты, которую вытягивают через валки из расплава стекла К-208 и отжигают для снятия остаточных механических напряжений после вытяжки. Такие пластины являются удобными модельными образцами для исследования влияния радиации на структуру поверхности стекла. Это связано с тем, что технология изготовления позволяет брать для экспериментов образцы одинакового химического состава с шероховатостью поверхности порядка 1 нм (рис. 1).

Облучение проводили в вакуумной камере испытательного стенда УВ-1/2 АО “Композит” при давлении  $10^{-4}$  Па. Для этого пластины прикрепляли к полированной поверхности металлического столика, термостатированного при температуре  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Облучали всю поверхность образца. Распределение плотности потоков частиц по поверхности столика контролировали с помощью 25 цилиндров Фарадея. Неравномерность пучка на столике диаметром 200 мм не превышала 10%.

Поверхности образцов до и после облучения исследовали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47-Multi-Technique SPM. Исследования проводились на девяти группах образцов, параметры облучения которых представлены в табл. 1. На образцы группы № 9 одновременно с протонами воздействовали еще и электроны с энергией  $E_e = 5$  кэВ. При плотности потока  $\phi_e = 1.84 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  флуенс электронов составил  $\Phi_e = 9 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

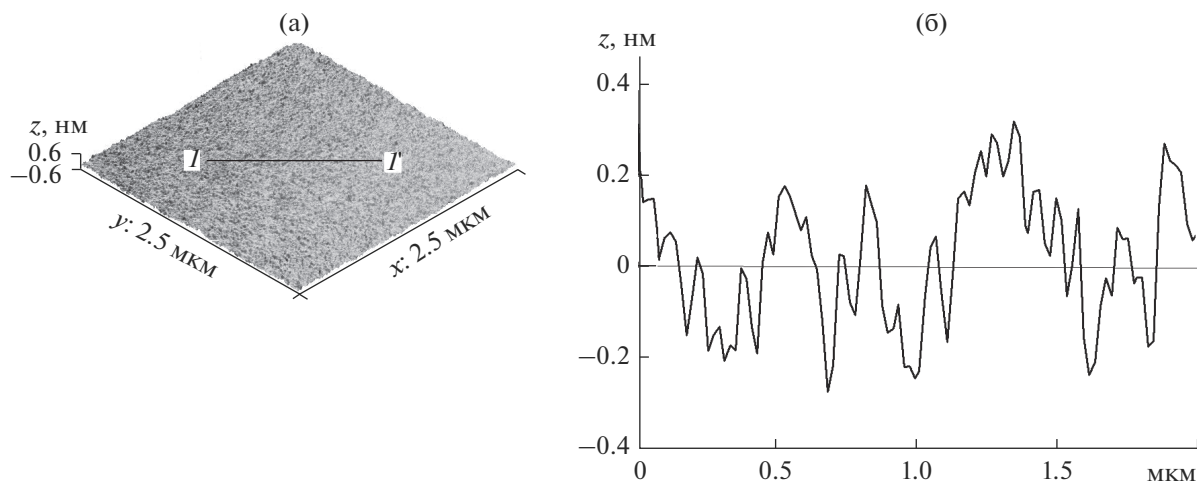


Рис. 1. АСМ-изображение необлученного образца: а – 3D-изображение фрагмента поверхности  $2.5 \times 2.5$  мкм; б – сечение фрагмента вдоль линии I–I'.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При подготовке экспериментов были проведены предварительные расчеты с помощью программы GANT-4, показавшие, что при толщине стекол 170 мкм через них не проникают электроны и протоны с энергией до 0.20 и 4.5 МэВ соответственно. Следовательно, стекла такой толщины служат надежной защитой от той части протонного излучения, которая вносит основной вклад в дозовые нагрузки на материалы, используемые на поверхностях высокоорбитальных спутников.

При исследовании поверхности первых шести групп облученных образцов, помимо микровыступов (газонаполненных пузырьков), которые наблюдались на К-208 после облучения протонами с  $E_p = 20$  кэВ [9, 10], были обнаружены микротрещины. В качестве иллюстрации на рис. 2 изображен фрагмент поверхности образца из второй группы с микротрещиной в центре. С увеличением флуенса протонов характер образующихся на образцах дефектов не меняется, а их линейные размеры возрастают. Это подтверждают изображения фрагментов поверхностей образцов групп № 2, 4 и 5 (рис. 2–4). Необходимо отметить, что при проведении дополнительных экспериментов микротрещины с линейными размерами до нескольких десятков микрометров наблюдались на стекле К-208, облученном протонами с  $E_p = 30$  кэВ при значениях  $\phi_p = 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $\Phi_p = 1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

На рис. 5 изображен фрагмент поверхности образца из группы № 7, облученного протонами с  $E_p = 20$  кэВ с той же плотностью потока и флуенсом, что и образцы второй группы. Из сравнения изображений, представленных на рис. 2 и 5, видно, что во втором случае концентрация микровыступов на образце почти в три раза больше, но они

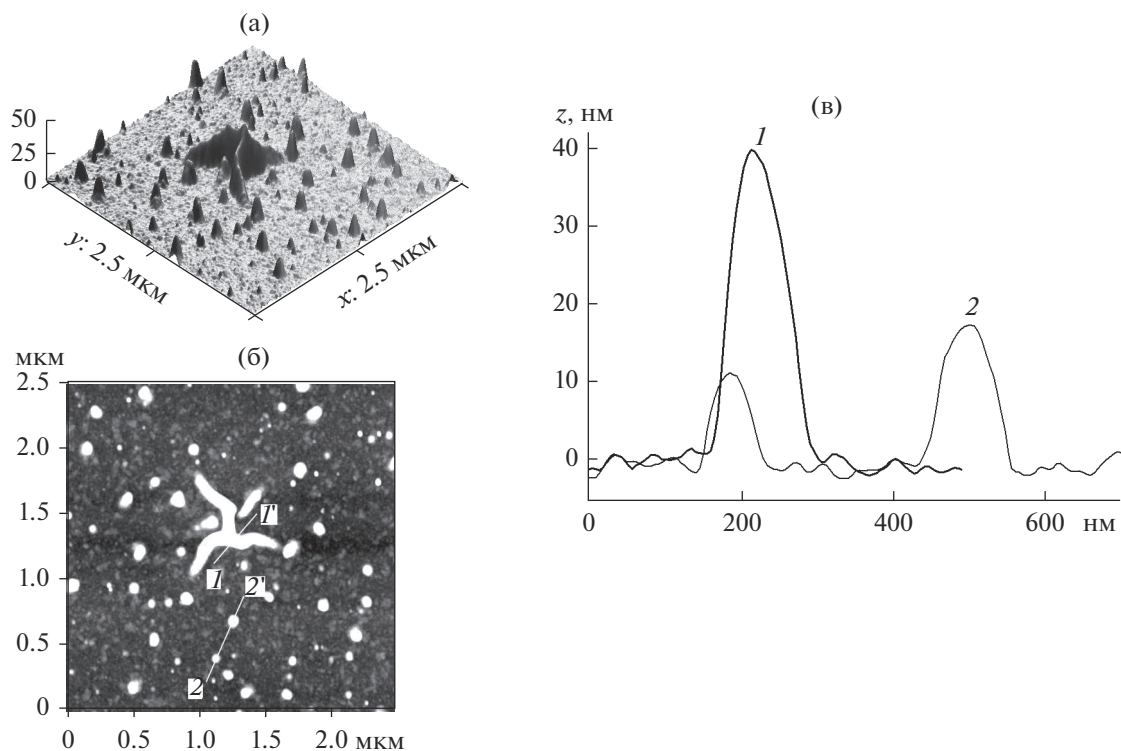
имеют меньшие размеры, и на его поверхности нет дефектов, подобных микротрещинам.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

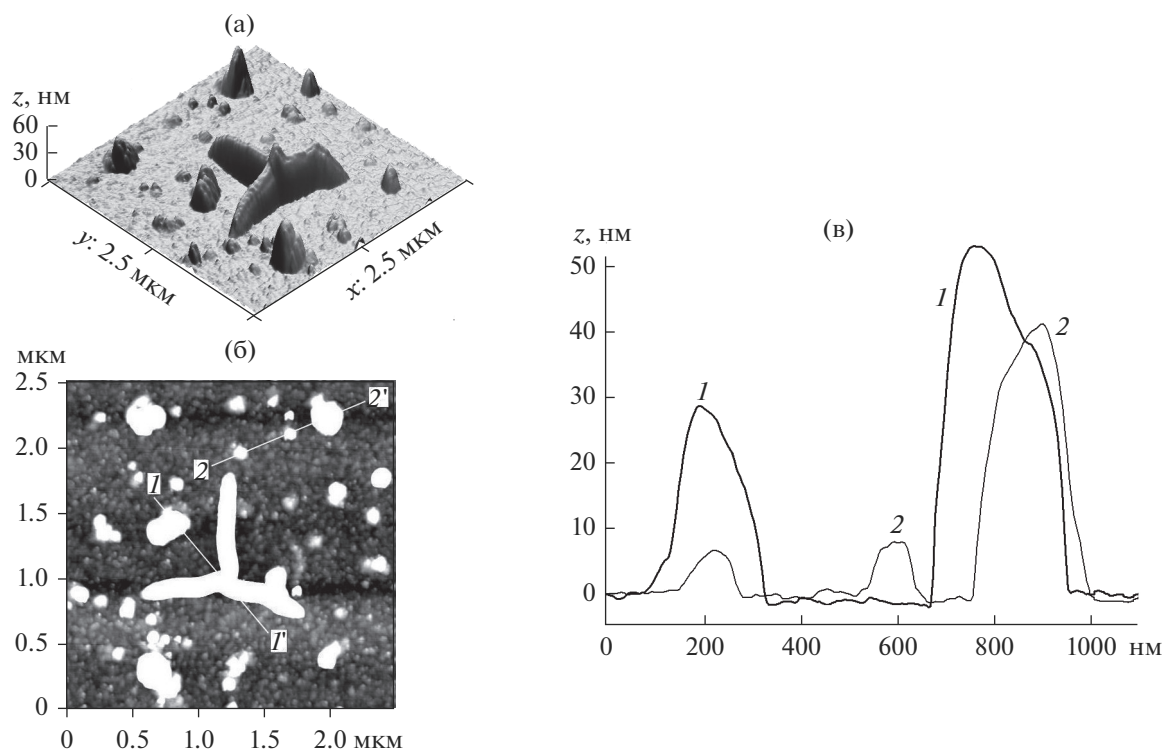
Известно, что в силикатном стекле каждый мостиковый кислород связывает два атома кремния ( $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ ). Однако присутствие ионов щелочных металлов приводит к локальному разрушению микроструктуры стекла и к появлению не мостиковых атомов кислорода. Такие атомы, связанные с ближайшим ионом  $\text{Na}^+$  ( $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Na}^+$ ) или  $\text{K}^+$  ( $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{K}^+$ ), служат для поддержания локальной нейтральности заряда. Поэтому пространственное перераспределение ионов щелочных металлов сопровождается высвобождением не мостиковых атомов кислорода, которые в дальнейшем способны мигрировать и скапливаться в окрестностях дефектов сетки стекла, образуя газонаполненные пузырьки.

Таблица 1. Параметры облучения образцов

№ группы	$E_p$ , кэВ	$\phi_p$ , $10^{-10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\Phi_p$ , $10^{-15} \text{ см}^{-2}$
1	30	4.50	1.1
2	30	4.50	2.2
3	30	4.50	3.3
4	30	4.50	4.4
5	30	4.50	5.5
6	30	4.50	6.6
7	20	4.50	2.2
8	20	6.75	3.3
9	20	6.34	3.1



**Рис. 2.** АСМ-изображение образца второй группы: а, б – 3D- и 2D-изображения фрагмента поверхности  $2.5 \times 2.5$  мкм; в – сечения вдоль линий 1–1' (1) и 2–2' (2).



**Рис. 3.** АСМ-изображение образца четвертой группы: а, б – 3D- и 2D-изображения фрагмента поверхности  $2.5 \times 2.5$  мкм; в – сечения вдоль линий 1–1' (1) и 2–2' (2).

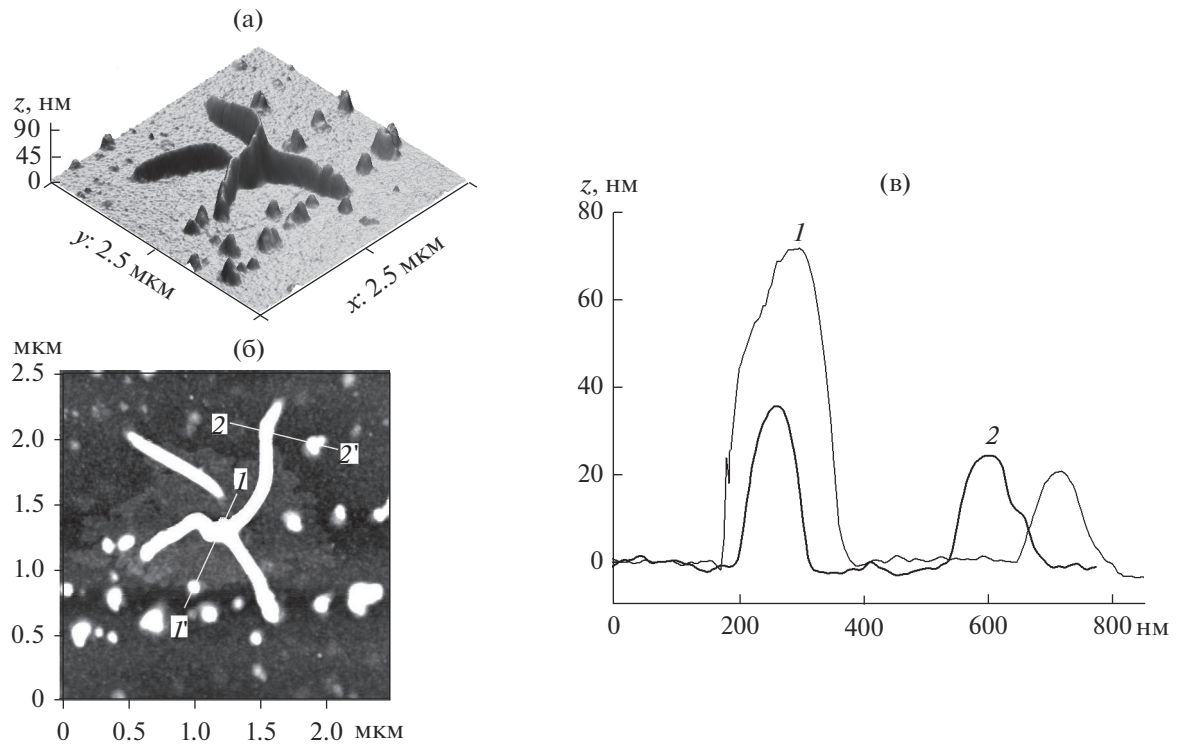


Рис. 4. АСМ-изображение образца пятой группы: а, б – 3D- и 2D-изображения фрагмента поверхности  $5 \times 5$  мкм; в – сечения вдоль линий 1–1' (1) и 2–2' (2).

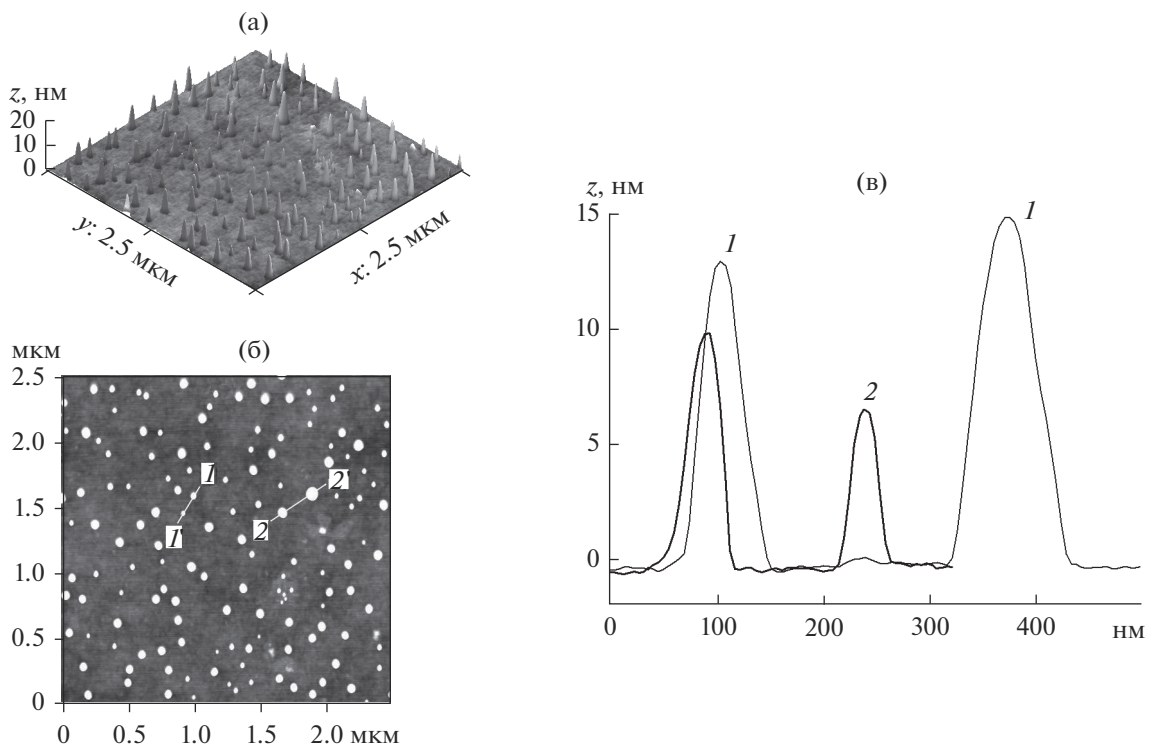


Рис. 5. АСМ-изображение образца седьмой группы: а, б – 3D- и 2D-изображения фрагмента поверхности  $2.5 \times 2.5$  мкм; в – сечения вдоль линий 1–1' (1) и 2–2' (2).

**Таблица 2.** Характерные размеры микротрещин ( $L$  и  $H$ ) и микровыступов ( $D$  и  $h$ )

№ группы	$L$ , мкм	$H$ , нм	$D$ , нм	$h$ , нм
1	0.40	22	180	18
2	0.75	43	190	23
3	1.20	50	200	25
4	1.50	58	205	26
5	1.75	80	210	30
6	3.20	83	210	33
7	0	0	120	10
8	0	0	140	13
9	0	0	130	12

Для ковалентной связи Si–O по сравнению с ионной O–Na<sup>+</sup> или O–K<sup>+</sup> характерны высокие значения упругих постоянных при сопоставимых значениях энергии связи. Поэтому энергия активации смещения ионов Na<sup>+</sup>  $\Delta E_{sNa} = 0.10$  эВ [30] и K<sup>+</sup>  $\Delta E_{sK} = 0.35$  эВ [31] значительно меньше энергии активации смещения атомов кислорода. Ионный радиус кислорода  $r_i = 1.37$  Å меньше, чем у K<sup>+</sup>, но больше чем у Na<sup>+</sup>, который изменяется от 1.00 до 1.24 Å с ростом координационного числа от 5 до 9. Минимальный радиус K<sup>+</sup> равен 1.38 Å, поэтому подвижность Na<sup>+</sup> в стекле больше, чем K<sup>+</sup>.

При взаимодействии со стеклом основная часть энергии протонов в результате столкновительной и электронной релаксации перераспределяется между атомами облучаемого слоя. Функция распределения атомов по энергии колебаний отклоняется от термодинамически равновесного состояния, что стимулирует миграционные процессы примесных атомов. Таким образом, пребывание Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup> в состоянии микроскопической неравновесности ускоряет их перераспределение под действием поля инжектированного в стекло заряда, что, в свою очередь, приводит к изменениям микроструктуры стекла.

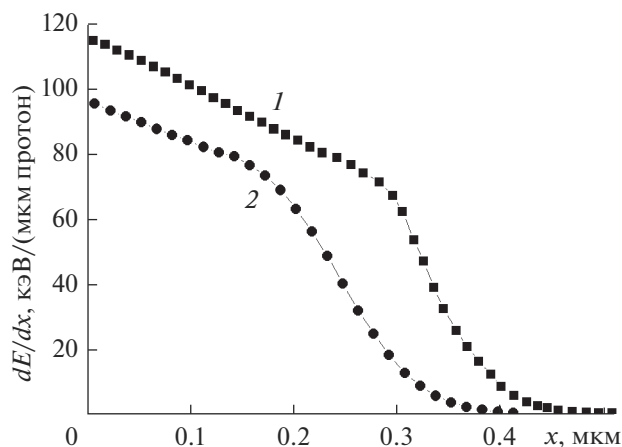
В предыдущих исследованиях изменений морфологии стекла при электронном [8], протонном [9] и электронно-протонном [10] облучении в качестве модельных материалов также использовали покровные стекла солнечных батарей космических аппаратов. Энергия электронов варьировалась от 10 до 50 кэВ, а энергия протонов  $E_p$  составляла 20 кэВ. Результаты исследований показали, что изменения морфологии стекла при раздельном электронном и протонном облучении обусловлены в основном появлением следов электростатических разрядов в первом и образованием газонаполненных пузырей во втором случае. Образование микротрещин под воздействием на стекло протонов с  $E_p = 20$  кэВ в [9] было за-

регистровано при  $\phi_p > 2.4 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>. Характер изменения структуры поверхности при электронно-протонном облучении зависел от отношения  $\phi_e$  к  $\phi_p$  [10].

Сравнительный анализ АСМ-изображений образцов, облученных протонами с  $E_p = 30$  и 20 кэВ, проведенный в настоящей работе, выявил существенную разницу в структурных изменениях поверхностей. В табл. 2 представлены характерные размеры микротрещин ( $L$  – линейный размер и  $H$  – высота) и микровыступов ( $D$  – максимальный диаметр основания и  $h$  – средняя высота) для девяти групп облученных образцов. Эти величины получены в результате усреднения соответствующих значений по трем образцам каждой группы.

Для интерпретации экспериментальных данных проводили расчеты переноса протонов с различной энергией через стекло К-208 по программе GANT-4. Из представленных на рис. 6 результатов следует, что глубина проникновения и удельные потери энергии протонов с  $E_p = 30$  кэВ больше, чем протонов с  $E_p = 20$  кэВ на 23 и 19% соответственно. Одной из причин столь существенных различий структурных изменений поверхностей облученных образцов (рис. 2 и 5) могло бы быть то, что при равенстве значений  $\phi_p$  и  $\Phi_p$  инжектируемые в стекло количества энергии соотносятся как 3 : 2. Для проверки этой гипотезы на образцы группы № 8 воздействовали протонами с  $E_p = 20$  кэВ. При значении  $\phi_p = 6.75 \times 10^{10}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> флуенс составил  $3.3 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Очевидно, что в этом случае в стекло внедряется больше положительного заряда, чем в образцы второй группы. Чтобы компенсировать поле этого “избыточного” заряда, на образцы группы № 9 одновременно с протонами воздействовали еще и электронами с энергией 5 кэВ при  $\phi_e = 1.84 \times 10^{10}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> и  $\Phi_e = 9 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, а флуенс протонов составил  $3.1 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. АСМ-исследования образцов групп № 8 и 9 показали, что изменения структуры их поверхностей такие же, что и у образца седьмой группы, фрагмент поверхности которого представлен на рис. 5, т.е. микротрещины на облученных поверхностях стекол не образуются.

В экспериментах глубина проникновения протонов с  $E_p = 20$  и 30 кэВ в стекло составляла около 0.4 и 0.5 мкм. Неравномерное распределение поглощенной энергии излучения и радиационно-стимулированные процессы перестройки микроструктуры в облучаемом слое стекла обуславливают неравномерное изменение его плотности, которое приводит к появлению растягивающих напряжений. В формирующееся поле механических напряжений определенным вклад вносит и образование газонаполненных пузырьков. В случае, когда величина результирующих



**Рис. 6.** Распределение выделенной в стекле К-208 энергии при протонном облучении с энергией 30 (1) и 20 кэВ (2).

напряжений превысит предел прочности стекла, на нем появляются микротрещины. В индуцированном облучением поле механических напряжений происходит также перенос массы к облучаемой поверхности. Этим объясняется возвышение области формирования микротрещин над периферией. Подробный анализ АСМ-изображений образцов показал, что “центрами” зарождения трещин являются микровыступы, в частности, газонаполненные пузырьки.

Анализ литературных данных и результатов выполненных экспериментов позволяет предположить, что основными взаимосвязанными процессами, вызывающими образование микротрещин на облучаемой протонами поверхности стекла К-208, являются: формирование области положительного объемного заряда; полевая миграция ионов натрия, ускоренная в облучаемом слое их присутствием в состоянии микроскопической неравновесности; появление в поверхностном слое растягивающих напряжений за счет уплотнения материала в результате перестройки микроструктуры стекла; формирование газонаполненных пузырьков, создающих дополнительные механические напряжения; перенос массы к облучаемой поверхности; а также, возможно, выход к облучаемой поверхности перколяционных каналов натрия и кислорода.

### ВЫВОДЫ

Облучение пластин стекла К-208 в вакууме  $10^{-4}$  Па протонами с энергией  $E_p = 30$  кэВ при плотности потока частиц  $\phi_p = 4.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и флуенсе в диапазоне  $\Phi_p = 1.1 \times 10^{15} - 6.6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  приводит к появлению на поверхности образцов газонаполненных пузырьков и микротрещин, линейные размеры которых растут с увеличением

флуенса. При облучении аналогичных образцов протонами с  $E_p = 20$  кэВ при прочих равных условиях облучения образование микротрещин не наблюдалось. Проведенный сопоставительный анализ результатов облучения стеклянных образцов протонами с энергией 30 и 20 кэВ позволяет предположить, что появление на стекле микротрещин при энергии воздействующих протонов  $E_p = 30$  кэВ обусловлено тем, что часть пузырьков газа образуется в стекле дальше от облучаемой поверхности, и пузырьки имеют большие размеры, чем при энергии протонов  $E_p = 20$  кэВ. В обоих случаях неравномерное по толщине уплотнение материала облучаемого слоя, связанное, согласно литературным данным, с перестройкой его микроструктуры за счет пространственного перераспределения Na, приводит к появлению растягивающих напряжений. Авторы полагают, что при облучении протонами с  $E_p = 30$  кэВ газонаполненные пузырьки создают в стекле дополнительное давление, направленное нормально к облучаемой поверхности, что в совокупности с поверхностными растягивающими напряжениями приводит к образованию микротрещин и переносу материала к области их формирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ferguson D.C., Wimberly S.C.* The Best GEO Daytime Spacecraft Charging Index. // *Proceed. 50th AIAA Aerospace Sci. Mtg. USA, 2013.* P. AIAA 2013-0810. <https://doi.org/10.2514/6.2013-810>
2. *Messenger S.R., Wong F., Hoang B. et al.* // *IEEE Transac. Nucl. Sci.* 2014. V. 61. № 6. P. 3348. <https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2364894>
3. *Toyoda K., Okumura T., Hosoda S., Cho M.* // *J. Spacecraft Rockets.* 2005. V. 42. № 5. P. 947. <https://doi.org/10.2514/1.11602>
4. *Wang Q., Geng H., Sun Ch. et al.* // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 119. P. 023103. <https://doi.org/10.1063/1.4939097>
5. *Jurek K., Gedeon O., Hulinsky V.* // *Mikrochim. Acta Suppl.* 1998. V. 15. P. 269. [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-7506-4\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-7506-4_36)
6. *Gedeon O., Hulinsky V., Jurek K.* // *Mikrochim. Acta.* 2000. V. 132. Iss. 2–4. P. 505. <https://doi.org/10.1007/s006040050050>
7. *Kowalski Z.W., Wilk J.* Ion-Beam Bombardment Modification of Surfaces. // *Proceed. 5th Eur. Conf. on Advanced Materials and Processes and Applications: Materials, Functionality & Design—Euromat 97.* Maastricht, The Netherlands, 1997. V. 3. P. 79.
8. *Khasanshin R.H., Novikov L.S.* // *Adv. Space Res.* 2016. V. 57. P. 2187. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.02.023>
9. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2018. № 11. С. 48. <https://doi.org/10.1134/S0207352818110136>
10. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.*

2017. № 9. С. 28.  
<https://doi.org/10.7868/S0207352817090049>
11. Norris C.B., Eernisse E.P. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. Iss. 9. P. 3876.  
<https://doi.org/10.1063/1.1663878>
  12. Primak W., Kampwirt R. // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. Iss. 12. P. 5651. /  
<https://doi.org/10.1063/1.1656029>
  13. Gavenda T., Gedeon O., Jurek K. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2014. V. 322. P. 7.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.12.017>
  14. Ollier N., Rizza G., Boizot B., Petite G. // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. Iss. 7. P. 073511.  
<https://doi.org/10.1063/1.2189026>
  15. Boizot B., Petite G., Ghaleb D. et al. // J. Non-Cryst. Solids. 1999. V. 243. P. 268.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00822-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00822-9)
  16. Chen L., Wang T.S., Zhang G.F. et al. // Chin. Phys. B. 2013. V. 22. № 12. P. 126101.
  17. Alley T.G., Myers R.A., Brueck S.R.J. // J. Non Cryst. Solids. 1998. V. 242. Iss. 2–3. P. 165.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00788-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00788-1)
  18. Masui H., Toyoda K., Cho M. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2008. V. 36. P. 2387.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2003191>
  19. Abbas A., Serruys Y., Ghaleb D. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2000. V. 166–167. P. 445.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00695-3](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00695-3)
  20. Zhang G.F., Wang T.S., Yang K.J. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2013. V. 316. P. 218.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.09.020>
  21. Chen L., Zhang D.F., Lv P. et al. // J. Non-Cryst. Solids. 2016. V. 448. P. 6.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnocryst.2016.06.029>
  22. Chen L., Wang T.S., Yang K.J. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2013. V. 307. P. 566.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.01.089>
  23. Ollier N., Charpentier T., Boizot B., Petite G. // J. Phys.: Condens. Matt. 2004. V. 16. P. 7625.  
<https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/43/006>
  24. Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Calas G. // J. Non-Cryst. Solids. 2001. V. 283. P. 179.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00338-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00338-6)
  25. Boizot B., Petite G., Ghaleb D. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2000. V. 166–167. P. 500.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00787-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00787-9)
  26. Ollier N., Boizot B., Reynard B. et al. // J. Nucl. Mater. 2005. V. 340. Iss. 2–3. P. 209.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.11.011>
  27. Ковивчак В.С., Попов В.Е., Панова Т.К., Бурлаков Р.Б. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2003. № 4. С. 38.
  28. Ковивчак В.С., Панова Т.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 8. С. 59.  
<https://doi.org/10.7868/S020735281708008X>
  29. Jensen T., Lawn B.R., Dalgligh R.L., Kelly J.C. // Rad. Eff.: Incomp. Plasma Sci. Plasma Technol. 1976. V. 28. Iss. 3–4. P. 245.  
<https://doi.org/10.1080/00337577608237446>
  30. Shelby J.E., Day D.E. // J. Am. Ceram. Soc. 1969. V. 52. P. 169.  
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1969.tb13358.x>
  31. Anderson O.L., Stuart D.A. // J. Am. Ceram. Soc. 1954. V. 37 P. 573.  
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1954.tb13991.x>

## Formation of Microcracks on the Surface of a Glass Irradiated with 30 keV Protons

R. H. Khasanshin<sup>1,2,\*</sup>, L. S. Novikov<sup>3</sup>, D. A. Primenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “Kompozit”, Korolev, 141070 Moscow Region, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: rhkhas@mail.ru

Changes in the surface structure of K-208 glass irradiation with 20 and 30 keV protons in vacuum ( $10^{-4}$  Pa) are studied using atomic force microscopy. It is found that on the surface of K-208 glass irradiated with 30 keV protons at a flux density of  $\phi_p = 4.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  and fluences  $\Phi_p = (1.1 \times 10^{15} - 6.6 \times 10^{15}) \text{ cm}^{-2}$ , microcracks are formed, the size of which grows with increasing fluence. The authors believe that the formation of microcracks is due to: the appearance of tensile stresses in the surface layer as a result of the restructuring of the glass microstructure caused by the migration of sodium ions in the field of the introduced charge; the formation of gas-filled bubbles; mass transfer to the irradiated surface; and, possibly, access to the irradiated surface of percolation channels of sodium and oxygen. For those values of  $\phi_p$  and  $\Phi_p$ , irradiation of K-208 glass with 20 keV protons is shown to not lead to the formation of microcracks.

**Keywords:** proton irradiation, K-208 glass, compression of glass, atomic force microscopy, microcrack, surface structure, ion field migration, gas-filled bubbles.