

## Прогнозирование радиационно-наведенного поглощения света в волоконных световодах с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла в космических применениях

© П.Ф. Кашайкин,<sup>1</sup> А.Л. Томашук,<sup>1</sup> М.Ю. Салганский,<sup>2</sup> И.С. Азанова,<sup>3</sup> М.К. Цибиногина,<sup>3</sup>  
Т.В. Димакова,<sup>3</sup> А.Н. Гурьянов,<sup>2</sup> Е.М. Дианов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научный центр волоконной оптики РАН,  
119333 Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> ОАО „Пермская научно-производственная приборостроительная компания“,  
614990 Пермь, Россия  
e-mail: kpf@fo.gpi.ru

Поступило в Редакцию 26 марта 2018 г.

В окончательной редакции 19 ноября 2018 г.

Принято к публикации 5 декабря 2018 г.

Исследовано радиационно-наведенное поглощение (РНП) света в пяти изотропных волоконных световодах (ВС) с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла ( $\text{SiO}_2$ ) и фторсиликатной оболочкой и одним двулучепреломляющим ВС типа „ПАНДА“ того же химического состава на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  при  $\gamma$ -облучении до дозы 1 кГу ( $\sim 1 \text{ Gy/s}$ ) и после завершения облучения в течение 15–45 мин и через несколько месяцев при температурах  $+25$  и  $-60^\circ\text{C}$ . Для оценки РНП в конце 15-летней миссии в космосе сделана экстраполяция РНП после облучения в рамках модели кинетики  $n$ -го порядка, которая дала прогноз РНП для изотропных ВС  $\sim 1.1$  и  $\sim 0.3 \pm 0.1 \text{ dB/km}$  при  $-60$  и  $+25^\circ\text{C}$  соответственно. Сделан вывод о возможности использования по меньшей мере 4–5 км ВС в космосе в условиях вариации температуры в пределах  $\pm 60^\circ\text{C}$  при максимальной дозе 1 кГу и длительности миссии 15 лет. Также установлено, что РНП к концу такой миссии в двулучепреломляющем ВС будет не выше, чем в изотропных.

DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47480.123-18

Волоконные световоды (ВС) востребованы для применений в космическом пространстве на спутниках в бортовых системах оптической передачи данных и в волоконно-оптических датчиках, в том числе волоконно-оптических гироскопах (ВОГ).

ВС на спутниках подвергаются действию космической радиации, создающей в сетке кварцевого стекла микроскопические дефекты (радиационные центры окраски, РЦО), поглощающие световой сигнал, распространяющийся по ВС, т.е. в ВС возникает радиационно-наведенное оптическое поглощение (РНП), которое может сильно ухудшить параметры волоконно-оптической системы вплоть до полной утраты прозрачности ВС. Проблема РНП в космосе усугубляется тем, что ВС будут работать в условиях вариации температуры, а при ее снижении замедляется термический распад РЦО и, как следствие, возрастает РНП.

В бортовых системах оптической передачи данных проблема РНП стоит не столь остро из-за малой длины ВС. С учетом фактора малости длины в Лаборатории военно-морского флота США (Naval Research Laboratory) была сделана оценка для предельно допустимой величины РНП в такой системе на спутнике — 300 dB/km [1,2]. При таком допуске на РНП разработка специальных радиационно-стойких ВС для многих миссий может и не потребоваться. К примеру, на основной современной длине волны для оптической связи

$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  в стандартном ВС SMF-28, содержащем в кварцевом стекле сердцевинной примесь германия в концентрации 3.5 mol.%  $\text{GeO}_2$ , РНП к концу миссии продолжительностью 15 лет с полной поглощенной дозой 1 кГу не превысит 5 dB/km, а во многомодовом градиентном ВС с германосиликатной сердцевинной и числовой апертурой 0.2 не превысит 20 dB/km. Эти оценки сделаны в предположении комнатной температуры на протяжении всей миссии. Если вся миссия будет проходить при  $-60^\circ\text{C}$ , то РНП в SMF-28 не должно превысить 75 dB/km, а во многомодовом ВС — 40 dB/km. Таким образом, при таких условиях проблемы с РНП в бортовых системах оптической передачи данных быть не должно.

Однако при более жестких условиях миссии (бóльшая доза, ниже температура, рабочий спектральный диапазон включает и более короткие длины волн) ВС, содержащие германий, могут проявить недопустимо большое РНП. Решением для таких миссий будет использование одномодовых ВС с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла ( $\text{SiO}_2$ ) и многомодовых градиентных ВС со фтором в сердцевине из  $\text{SiO}_2$  [3]. Для изготовления таких многомодовых ВС требуется плазмохимическая технология PCVD [4].

Актуальной задачей является достижение низкого РНП в одномодовых двулучепреломляющих ВС в ВОГ. Длина такого ВС составляет 1–5 км, а предельно до-

пустимое РНП не превышает единиц  $\text{dB/km}$  (рабочая длина волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ). Наиболее подходящими являются одномодовые двулучепреломляющие ВС с сердцевиной из нелегированного  $\text{SiO}_2$  и фторсиликатной светоотражающей оболочкой [5,6].

Ранее установлено, что РЦО в ВС с сердцевиной из нелегированного  $\text{SiO}_2$  при космических дозах ( $< 10 \text{ Gy}$ ) могут быть обусловлены двумя факторами: деформациями сетки стекла ВС и наличием в ней примеси хлора [7–10]. Хлорный РЦО имеет максимум РНП в ультрафиолетовой области, а деформационные РЦО — в видимой области, при этом хвосты и тех и других РЦО и создают значительное РНП и на  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .

Недавно была продемонстрирована возможность оптимизации технологических режимов получения преформ изотропных ВС с сердцевиной из нелегированного  $\text{SiO}_2$  и фторсиликатной оболочкой с целью снижения РНП в высокоинтенсивных полях ионизирующего излучения (мощность дозы  $\sim 1 \text{ Gy/s}$  и более) [7,8,11]. В частности, путем создания большого избытка  $\text{O}_2$  над  $\text{SiCl}_4$  в парогазовой смеси в процессе синтеза стекла сердцевины преформы ВС удалось предотвратить вхождение хлора в сетку стекла и тем самым практически полностью исключить увеличение РНП за счет хлорных РЦО. Кроме того, за счет точного согласования отношения молярных расходов  $\text{O}_2$  и  $\text{SiCl}_4$  с концентрацией фтора в оболочке удалось добиться существенного снижения деформаций сетки стекла, возникающих при вытяжке ВС, и тем самым существенно подавить РЦО, вызванные деформациями сетки [7,8]. Таким образом, в результате оптимизации технологических режимов получения преформ удалось снизить РНП в ближнем ИК-диапазоне, более чем на порядок [8].

Возникает вопрос, в какой мере такая оптимизация технологии способна уменьшить РНП в космосе, когда мощность дозы несоизмеримо меньше ( $10^{-6}$ – $10^{-5} \text{ Gy/s}$ ), но при этом возможно снижение температуры.

В лабораторных условиях проблематично создать сценарий эксперимента, полностью аналогичный космическому облучению (доза  $\sim 1 \text{ kGy}$  поглощается световодом за время работы на орбите 10–15 лет [1,2]!). Поэтому, необходимо применять методы ускоренного тестирования. Наиболее распространенный в мире метод основывается на так называемой модели кинетики  $n$ -го порядка [1,12–15]. Суть применения данной модели к оценке РНП в космосе заключается в следующем. ВС облучают в лабораторных условиях до дозы, которую ВС должен получить к концу миссии, при этом мощность дозы может быть гораздо больше космической (на порядки величины). Затем после завершения облучения измеряется зависимость спада РНП от времени и по уравнениям модели делается экстраполяция РНП на момент времени, равный полной продолжительности миссии [1,12–15].

Экспериментальная проверка модели кинетики  $n$ -го порядка была успешно осуществлена в работе [14]:

экстраполяционные значения РНП на момент времени 9.5 лет, полученные из экспериментов с мощностями дозы, отличающимися в 50 (!) раз, отлично совпали между собой.

Цели настоящей работы: 1) сравнение РНП в изотропных одномодовых ВС с сердцевиной из нелегированного  $\text{SiO}_2$ , изготовленных в различных технологических режимах, в том числе оптимизированных для снижения РНП в задачах атомной энергетики при больших мощностях дозы; 2) сравнение РНП в изотропных и двулучепреломляющих ВС с сердцевиной из нелегированного и легированного германием  $\text{SiO}_2$ ; 3) экстраполяция РНП на время космической миссии 15 лет.

В настоящей работе мы постулировали дозу, поглощенную к концу миссии ( $1 \text{ kGy}$ ), при вариации температуры в пределах  $\pm 60^\circ\text{C}$ , что хорошо соответствует среднему значению дозы при длительности космической миссии продолжительностью 10–15 лет [1,2,14].

## 1. Детали эксперимента

### Образцы

Методом MCVD в ИХВВ РАН были изготовлены пять преформ ВС 1–5 (табл. 1) с сердцевиной из нелегированного  $\text{SiO}_2$  и фторсиликатной светоотражающей оболочкой. В НЦВО РАН из этих преформ были вытянуты изотропные одномодовые ВС при одинаковых условиях вытяжки. ВС 1, 3 и 4 были ранее исследованы при более высоких дозах при комнатной температуре в работе [7], а ВС 1, 2 и 5 — в работе [8].

Преформы ВС 1–5 были синтезированы в различных технологических режимах. Во-первых, ВС 2 и 5 имели более низкое содержание фтора в оболочке, что привело к более низкой разности показателей преломления сердцевины и оболочки ( $\Delta n = 0.005$ ), в то время как у остальных ВС  $\Delta n = 0.009$ – $0.0095$ .

Во-вторых, отношение  $r$  молярных расходов  $\text{O}_2$  и  $\text{SiCl}_4$  на стадии синтеза сердцевины варьировало между преформами (в табл. 1  $r$  нормировано на  $r_0 = 29$ ). Эти два технологических фактора ( $\Delta n$  и  $r$ ) и их взаимосоответствие практически полностью определили РНП в ближнем ИК-диапазоне, как было установлено в предыдущих работах [7,8].

С увеличением значения  $r$  содержание хлора в сердцевине уменьшалось, как следует из прямых измерений концентрации, проведенных в [7] (табл. 1). Поэтому ВС 1 и 5, изготовленные с наибольшим значением  $r = 2$ – $2.2$ , вообще не проявили хлорных РЦО в предыдущих работах [7,8].

ВС 4 с  $r = 1$  продемонстрировал хлорные РЦО, но только в процессе релаксации после завершения облучения, тогда как РНП во время облучения было в основном обусловлено деформационными РЦО [7].

РНП у ВС 3 с наименьшим значением  $r$ , напротив, было в основном обусловлено хлорными РЦО, однако, быстрый спад РНП в течение 1 min релаксации после

Таблица 1. Характеристики световодов

Обозначение ВС	$\Delta n$ ( $10^{-3}$ )	$r$	Концентрация GeO <sub>2</sub> в сердцевине (mol.%)	Концентрация Cl в сердцевине (wt. ppm)	Степень вмороженных деформаций сетки стекла	Обозначения ВС в предыдущих работах
1	9.5	2	—	86	низкая	[7], „O <sub>2</sub> :SiO <sub>2</sub> “ [8], „fiber 5“
2	5.0	1	—	—	низкая	[8], „fiber 8“
3	9.5	0.4	—	230	средняя	[7], „Cl:SiO <sub>2</sub> “
4	9.0	1	—	192	высокая	[7], „SiO <sub>2</sub> -II“
5	5.0	2.2	—	—	высокая	[8], „fiber 2“
PANDA-SiO <sub>2</sub>	~ 10	—	—	—	—	—
SMF-28	5.0	—	3.5	—	—	—
PANDA-GeO <sub>2</sub>	~ 10	—	7	—	—	—

Примечание.  $\Delta n$  — разность показателей преломления сердцевины и оболочки,  $r$  — отношение молярных расходов O<sub>2</sub> и SiCl<sub>4</sub> при осаждении сердцевины преформы, нормированное на  $r_0 = 29$ .

прекращения облучения (на ~ 20%) в предыдущем исследовании [7] указал на некоторый вклад и деформационных РЦО, отличающихся малым временем жизни.

В ВС 1 и 2 значение  $r$  было сбалансировано с содержанием F в оболочке, поэтому деформации сетки стекла и вызванные ими РЦО были в этих ВС минимальны. РНП в ВС 1 и 2 во время и после облучения при мощности дозы 8.7 Gy/s до 94 kGy практически совпали на длине волны  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$  и лишь незначительно отличались на  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  из-за, по-видимому, чуть большего содержания хлора в ВС 2. Это, в свою очередь, было вызвано в два раза меньшим избытком кислорода при синтезе сердцевины преформы ВС 2 [8] (табл. 1).

ВС 4 и 5 имели сильное несоответствие между значением  $r$  и содержанием фтора в оболочке (табл. 1) и поэтому значительные вмороженные деформации, бóльшие, чем у ВС 1–3. По этой причине и РНП в ВС 4 и 5 в предыдущем исследовании при мощности дозы 8.7 Gy/s было наибольшим [8].

Таким образом, предыдущие исследования [7,8] выявили существенное различие РНП у ВС 1–5. Возникал вопрос, как проявятся эти различия при моделировании РНП в космических условиях и какой ВС окажется лучшим.

Кроме изотропных ВС 1–5 в ОАО „Пермская научно-производственная приборостроительная компания“ были изготовлены два одномодовых двулучепреломляющих ВС типа „ПАНДА“ с сердцевиной из нелегированного SiO<sub>2</sub> („PANDA-SiO<sub>2</sub>“) и кварцевого стекла, легированного германием („PANDA-GeO<sub>2</sub>“).

Также для сравнения исследовался стандартный одномодовый ВС для оптической связи SMF-28.

### Эксперимент

Гамма-облучение ВС проводилось в НИЦ „Курчатовский институт“ на установке ГУТ-200М с активным источником <sup>60</sup>Со.

Отрезки световодов длиной 30–200 м были намотаны на катушки диаметром 80 мм. Катушки облучались

поочередно, для чего они размещались в термостате, который, в свою очередь, располагался в одной и той же калиброванной по мощности дозы точке в облучательной камере. Концы исследуемых ВС были приварены к специальным радиационно-стойким ВС, подсоединенным к источнику света и спектрометру, находящимся за биологической защитой.

После подъема кобальтовых стержней из подземного хранилища ВС подвергались воздействию  $\gamma$ -излучения с мощностью дозы 1.0–1.1 Gy/s при температуре –60 или +25°C. Облучение продолжалось в течение 15–16 min до общей поглощенной дозы ~ 1 kGy. После прекращения облучения происходила релаксация РНП в световодах в течение 15–45 min, а температура оставалась постоянной при облучении и релаксации с точностью  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ .

В процессе облучения и релаксации с временным шагом 30 s происходила регистрация спектров в ближнем ИК-диапазоне с помощью спектрометра на диодной линейке состава InGaAs NIR-128 фирмы „Avantes“ (регистрируемый спектральный диапазон 1100–1700 nm), или NIRQuest 512 фирмы „Ocean Optics“ (900–1750 nm). Источником света служила галогеновая лампа накаливания HL-2000 фирмы „Avantes“. Для минимизации эффекта фотообесцвечивания РЦО видимая часть спектра ( $\lambda < 900 \text{ nm}$ ) на входе в ВС обрезалась с помощью фильтра ИКС-3. Мощность зондирующего света в ВС в этом случае не превышала 0.5  $\mu\text{W}$ .

Подробная схема экспериментальной установки представлена в работе [16].

После облучения на установке ГУТ-200М ВС были возвращены в НЦВО РАН, где в течение некоторого времени (от 1 до 22 месяцев) в них проводились измерения РНП на длине волны 1.55  $\mu\text{m}$  с помощью оптического рефлектометра EXFO FTB-400. Эти дополнительные точки зависимости РНП от времени позволили повысить точность экстраполяции РНП на момент времени „15 лет“.

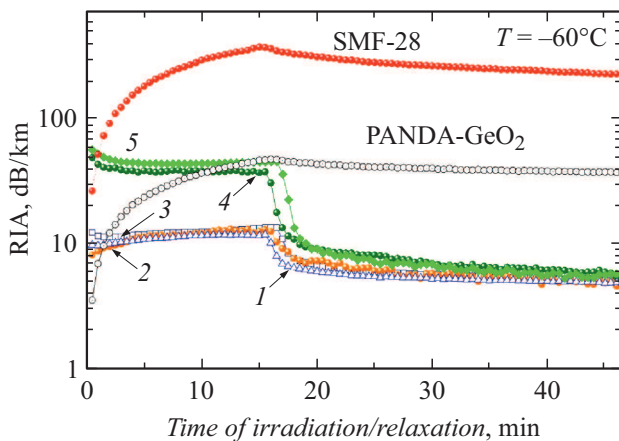
## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 1, 2 представлены результаты  $\gamma$ -облучения ВС при  $T = -60^\circ\text{C}$ : на рис. 1 показана эволюция РНП в процессе облучения и релаксации на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , на рис. 2, *a* представлены спектры РНП, измеренные во время облучения при поглощенной дозе 1 kGy, на рис. 2, *b* — спектры РНП, измеренные через 15 min релаксации после завершения облучения до дозы 1 kGy.

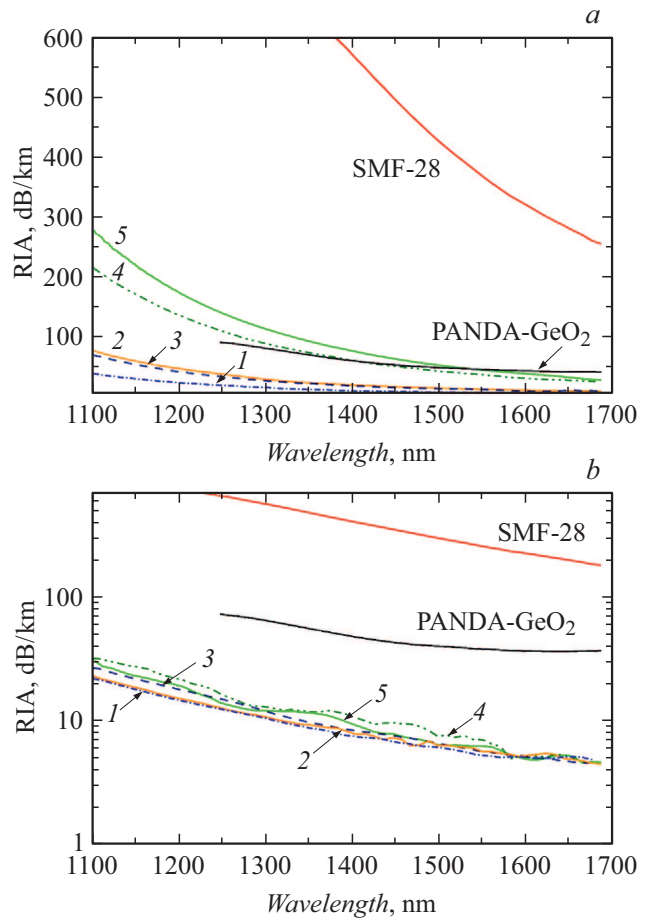
Из рис. 1 видно, что ВС 1–3 демонстрируют практически одинаковое РНП на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  в процессе облучения во всем диапазоне доз до 1 kGy (за исключением только небольшого выброса РНП в начале облучения в ВС 2 и 3, физическая природа которого объяснена в [16] и который никак не повлиял на эволюцию РНП при дозах более  $\sim 100 \text{Gy}$ ). Стоит обратить внимание на то, что РНП в неоптимизированных ВС 4 и 5, содержащих значительные деформации сетки стекла, в 3–4 раза больше. В этих ВС также проявился небольшой скачок РНП в начале облучения.

Несмотря на разницу РНП непосредственно в процессе облучения, через 30 min релаксации после облучения все ВС с нелегированной сердцевиной показали очень близкое значение РНП на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  —  $5.2 \pm 1.0 \text{ dB/km}$ . Напомним, что для космических применений важно именно РНП при релаксации. Из рис. 1 также видно, что РНП в ВС с германием в сердцевине практически не релаксирует при  $T = -60^\circ\text{C}$ .

Сравнение спектров РНП, измеренных в процессе облучения при  $T = -60^\circ\text{C}$  (рис. 2, *a*), показывает, что именно коротковолновый хвост РНП вносит основной вклад в общее РНП на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  во всех исследованных ВС. Из ВС с сердцевиной из нелегированного  $\text{SiO}_2$  этот хвост наиболее интенсивен в



**Рис. 1.** Эволюция РНП (RIA) в ВС 1–5 с сердцевиной из нелегированного  $\text{SiO}_2$  и в двух германосиликатных световодах SMF-28 и PANDA- $\text{GeO}_2$  в процессе  $\gamma$ -облучения на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  до дозы  $\sim 1 \text{Gy}$  при мощности дозы 1.0 или 1.1 Gy/s (в течение 16 или 15 min соответственно) и в течение  $\sim 30 \text{min}$  релаксации после облучения. Облучение ВС и измерение РНП поведено при  $T = -60^\circ\text{C}$ .



**Рис. 2.** Спектры РНП (RIA) в ВС 1–5 с сердцевиной из нелегированного  $\text{SiO}_2$  и в двух германосиликатных световодах SMF-28 и PANDA- $\text{GeO}_2$  в процессе облучения при поглощенной дозе  $\sim 1 \text{kGy}$  (*a*) и через 15 min релаксации после завершения облучения до дозы 1 kGy (*b*). Облучение ВС и измерение спектров проведено при  $T = -60^\circ\text{C}$ .

ВС 4 и 5 с наиболее деформированной сеткой стекла. Наименьший коротковолновый хвост демонстрирует ВС 1, имеющий наименьшие деформации сетки стекла и содержащий лишь малую примесь хлора в сердцевине. В случае световодов ВС 2 и 3 коротковолновый хвост, очевидно, связан с хлорными РЦО.

Интересным является тот факт, что световод SMF-28, имеющий в два раза меньшее содержание  $\text{GeO}_2$  в сердцевине, чем световод PANDA- $\text{GeO}_2$ , продемонстрировал тем не менее гораздо большее РНП во всем исследуемом спектральном диапазоне. Меньшее РНП в ВС с бóльшей концентрацией  $\text{GeO}_2$  в сердцевине наблюдается только при пониженных температурах, тогда как при комнатной температуре зависимость РНП от концентрации  $\text{GeO}_2$  обратная. Этот эффект заслуживает отдельного исследования.

Спектры РНП всех ВС с сердцевиной из нелегированного  $\text{SiO}_2$  через 15 min релаксации (рис. 2, *b*) практически совпали, что коррелирует с результатом на рис. 1. Видно, что, как и в процессе облучения (рис. 2, *a*),

**Таблица 2.** Коэффициенты экстраполяции и прогнозируемые значения РНП через 15 лет миссии

BC	Температура, °C	$A_0$ , dB/km	$A_f$ , dB/km	$\tau$ , min	$n$	РНП через 15 лет dB/km
SMF-28	+25	25.2	3.8	36.6	5.2	4.3
PANDA-GeO <sub>2</sub>		28.9	17.0	220.6	6.1	17.5
<i>I</i>		9.2	0.0	0.1	9.6	0.27
<i>I</i>	-60	16.0	0.0	0.8	9.2	1.1

максимумы всех РЦО лежат в коротковолновой области спектра.

Экстраполяция релаксации РНП на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  на время миссии в космосе в 15 лет проводилась в рамках модели кинетики  $n$ -го порядка [1,12–15] (рис. 3) по формуле

$$A(t) = (A_0 + A_f)(1 + ct)^{-x} + A_f, \quad (1)$$

$$c = (2^{n-1} - 1)/\tau, \quad x = 1/(n - 1), \quad (2)$$

где  $A(t)$  — зависимость РНП от времени после облучения,  $A_0$  — исходное РНП в начале релаксации,  $A_f$  — РНП в конце экстраполяции;  $\tau$  — время, за которое РНП в процессе релаксации уменьшается в 2 раза,  $n$  — порядок кинетики релаксации РНП [1,12–15]. Все четыре параметра уравнений (1) и (2) —  $A_0$ ,  $A_f$ ,  $\tau$  и  $n$  — были найдены численно с помощью компьютерного программного обеспечения (табл. 2).

Для трех BC, облученных также и при комнатной температуре (рис. 3), были измерены дополнительные точки РНП через 40, 155, 173, 270 и 663 дней после облучения с помощью оптического рефлектометра методом OTDR (Optical Time Domain Reflectometry), что позволило повысить точность экстраполяции [12]. Точки РНП, измеренные для световода PANDA-GeO<sub>2</sub> через 270 и 663 дней после окончания облучения, при построении экстраполяции не учитывались, но при этом попали на экстраполяционную кривую с хорошей точностью. Этот факт свидетельствует о высокой точности использованной модели при экстраполяции РНП на срок 15 лет по измерениям РНП только в течение первых 30 min релаксации, а затем через 40 дней после облучения. Стоит отметить, что экстраполяция для BC *I* при  $T = 60^\circ\text{C}$  была проведена только на основе 45 min релаксации и поэтому не является столь же точной, как три другие экстраполяции.

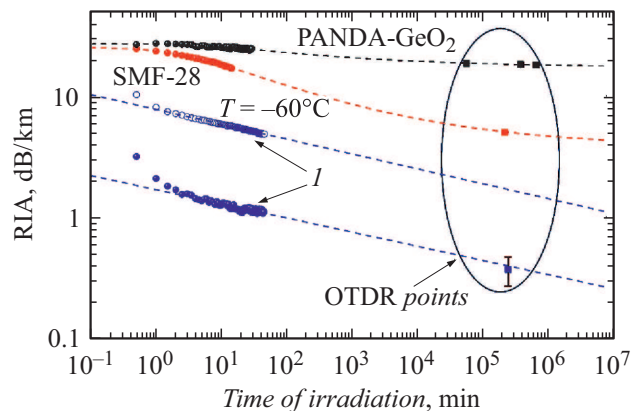
Для двулучепреломляющего BC PANDA-GeO<sub>2</sub> экстраполяция РНП на 15 лет даже при комнатной температуре дала  $\sim 18 \text{ dB/km}$ , что, очевидно, является недопустимо большим значением (рис. 3, табл. 2). Прогноз для световода SMF-28 при комнатной температуре ( $4.3 \text{ dB/km}$ ) можно считать удовлетворительным для длины отрезка BC в космосе  $\sim 1\text{--}1.5 \text{ km}$ , однако, как

следует из рис. 2, *a*, при  $T = -60^\circ\text{C}$  РНП в этом BC будут неприемлемо высоко.

Из рис. 3 видно, что в течение первых 2.5 min релаксации РНП у BC *I* при обеих температурах происходил сверхбыстрый распад короткоживущих РЦО, которые, очевидно, не возникли бы при несоизмеримо более низкой мощности дозы в космосе. Поэтому эти точки РНП мы не учитывали при построении релаксации так же, как это делалось и в работах других авторов [12,14].

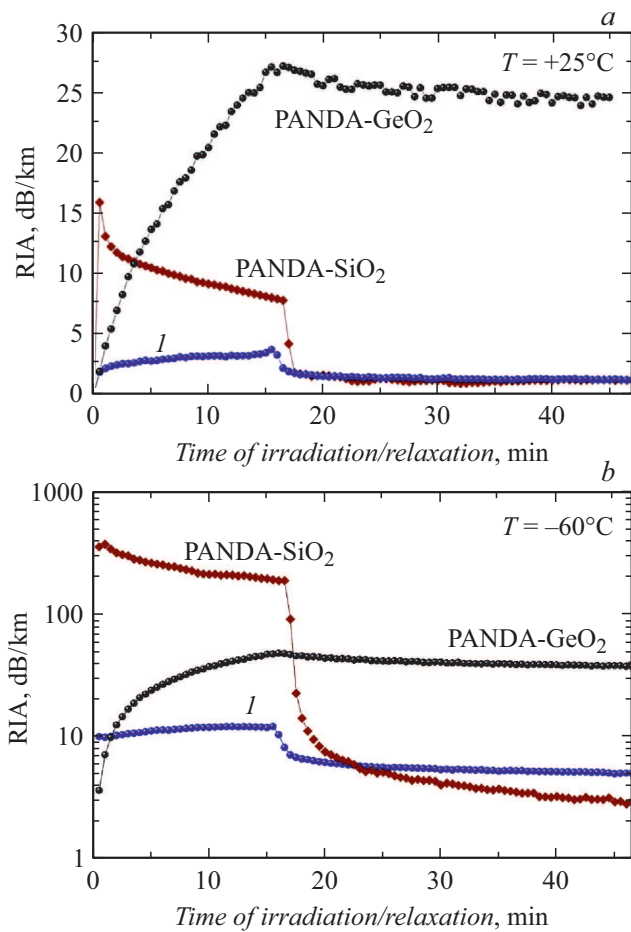
Интересно, что модель предсказала релаксацию РНП до нуля ( $A_f \sim 0$ ) для BC *I* при комнатной температуре и при  $T = -60^\circ\text{C}$  при времени релаксации, стремящемся к бесконечности. Следует также отметить, что значения  $n$  экстраполяции BC *I* оказались довольно близкими при обеих температурах ( $n = 9.2$  и  $9.6$ ), что, по всей видимости, закономерно.

Вилка значений РНП  $0.27\text{--}0.47 \text{ dB/km}$  в момент времени „173 дня“ на экстраполяционной кривой BC *I* при  $T = 25^\circ\text{C}$  показывает разброс РНП среди всех пяти BC с сердцевиной из нелегированного SiO<sub>2</sub>; при этом РНП у BC *I* лежит точно по середине этой вилки. Видно, что РНП в BC *I* составит  $\sim 0.27 \text{ dB/km}$  в конце 15-летней миссии при комнатной температуре и  $\sim 1.1 \text{ dB/km}$ , если вся миссия будет проходить при  $T = -60^\circ\text{C}$  (рис. 2, табл. 2). Исходя из вилки РНП для BC *I*–5 в момент времени „173 дня“, можно сделать приблизительную оценку разброса РНП в момент времени „15 лет“ —  $\sim 0.2\text{--}0.4 \text{ dB/km}$ . Таким образом, можно заключить, что при  $T = +25^\circ\text{C}$  к концу 15-летней космической миссии все BC *I*–5 будут иметь достаточно низкий уровень



**Рис. 3.** РНП (RIA) в течение 15–45 min после завершения  $\gamma$ -облучения до дозы  $1 \text{ kG}$  в четырех BC (круги) и значения РНП, измеренные по методу OTDR через 40, 155, 173, 270 и 663 дней после завершения  $\gamma$ -облучения (прямоугольники). РНП в одном отрезке BC *I* измерялось при  $T = -60^\circ\text{C}$  (открытые круги), а в трех остальных отрезках BC — при  $T = +25^\circ\text{C}$ . Пунктирные линии показывают экстраполяцию экспериментальных точек РНП на время  $10^7 \text{ min}$  по модели кинетики  $n$ -го порядка. Вилка значений РНП у BC *I*, измеренная через 173 дня после облучения, показывает разброс РНП среди всех пяти BC *I*–5. Начальные точки РНП у BC *I* на временах менее 2.5 min, соответствующие сверхбыстрой релаксации РНП, при построении экстраполяционных кривых не учитывались.





**Рис. 4.** Эволюция РНП (RIA) в ВС I с сердцевиной из нелегированного SiO<sub>2</sub> и в двух двулучепреломляющих световодах PANDA-SiO<sub>2</sub> и PANDA-GeO<sub>2</sub> в процессе  $\gamma$ -облучения на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  до дозы  $\sim 1 \text{ Gy}$  при мощности дозы 1.0 или 1.1 Gy/s (в течение 16 или 15 min соответственно) и в течение  $\sim 30 \text{ min}$  релаксации после облучения. Облучение ВС и измерение РНП поведено при  $T = +25^\circ\text{C}$  (a) и при  $T = -60^\circ\text{C}$  (b).

РНП для использования отрезков длиной 10 km и более. Если же вся миссия будет проходить при  $T = -60^\circ\text{C}$ , то допустимая длина ВС будет, очевидно, меньше и составит 4–5 km. Однако напомним, что сделанная экстраполяция РНП при  $T = -60^\circ\text{C}$  была, скорее всего, недостаточно точной, так как мы не смогли поддерживать данную температуру ВС в течение длительного времени и поэтому не были проведены измерения РНП спустя месяцы после облучения. Тем не менее можно с достаточной определенностью утверждать, что в условиях вариации температуры в пределах  $\pm 60^\circ\text{C}$  при максимальной дозе 1 kGy и длительности миссии 15 лет, использование, по меньшей мере, 4–5 km ВС с сердцевиной из нелегированного SiO<sub>2</sub> возможно.

Интересным является тот факт, что в отличие от применений ВС с сердцевиной из нелегированного SiO<sub>2</sub> при высоких мощностях дозы, когда РНП в зависимости от режимов изготовления преформы может отличаться

многократно [7,8,16], при малой космической мощности дозы все ВС с сердцевиной из нелегированного SiO<sub>2</sub> проявят приблизительно одинаковое РНП. Поэтому какая-то дополнительная оптимизация технологии преформ ВС с сердцевиной из нелегированного SiO<sub>2</sub> для уменьшения РНП в космосе не требуется.

На рис. 4 показаны эволюция РНП в процессе облучения и релаксации ВС PANDA-SiO<sub>2</sub> на  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  при  $T = +25$  и  $-60^\circ\text{C}$  соответственно. Для сравнения приведены соответствующие кривые для ВС I и PANDA-GeO<sub>2</sub>.

Во-первых, обращает на себя внимание большое РНП в PANDA-SiO<sub>2</sub> непосредственно в процессе облучения, особенно в сравнении с изотропным ВС I. РНП резко возрастает в начале облучения, а потом плавно снижаются по мере продолжения облучения. Такое поведение характерно для РНП, вызванных деформациями сетки стекла [16]. Очевидно, что причина более значительных деформаций сетки стекла в PANDA-SiO<sub>2</sub>, чем в изотропном ВС I, состоит в наличии напрягающих боросиликатных стержней, создающих двулучепреломление.

Однако деформационные РЦО в PANDA-SiO<sub>2</sub> оказались очень короткоживущими: при  $T = +25^\circ\text{C}$  сразу после завершения облучения РНП падает до уровня РНП в ВС I (рис. 4, a), а при  $T = -60^\circ\text{C}$  — даже ниже уровня РНП, измеренного в ВС I (рис. 4, b).

К сожалению, мы не сделали экстраполяцию РНП на 15-летнюю миссию для ВС PANDA-SiO<sub>2</sub>, однако уже из сравнения 30 min релаксации этого ВС и ВС I на рис. 4 можно сделать выводы об ожидаемых РНП в космосе: при обеих температурах РНП в PANDA-SiO<sub>2</sub> будут не выше, чем в ВС I, т.е. не выше, чем 0.27 и 1.1 dB/km в конце 15-летней миссии, проведенной при  $T = +25$  и  $-60^\circ\text{C}$  соответственно. Не исключено, что при  $T = -60^\circ\text{C}$  РНП будет даже ниже 1.1 dB/km.

## Заключение

Пять ВС с сердцевиной из нелегированного SiO<sub>2</sub>, изготовленные при различных режимах MCVD-процесса и проявившие поэтому многократно различные РНП в процессе  $\gamma$ -облучения с высокой мощностью дозы ( $\geq 1 \text{ Gy/s}$ ), показали тем не менее близкое РНП на длине волны  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  в процессе релаксации после  $\gamma$ -облучения до дозы 1 kGy ( $\sim 1 \text{ Gy/s}$ ): РНП всех ВС оставило всего  $5.2 \pm 1.0 \text{ dB/km}$  при  $T = -60^\circ\text{C}$  уже через 30 min релаксации. Это означает, что содержание хлора в сетке стекла и ее деформации, создающие проблемы для применений ВС при большой мощности дозы, не будут играть заметной роли при применениях ВС в космосе.

РНП, измеренные в этих световодах методом оптической рефлектометрии при комнатной температуре через 173 дня после облучения, оказались в диапазоне 0.27–0.47 dB/km. Экстраполяция в рамках модели кинетики  $n$ -го порядка дала среднее значение РНП к концу 15-летней миссии, при комнатной температуре

~ 0.3 dB/km при разбросе между различными световодами 0.2–0.4 dB/km. Экстраполяция, сделанная для  $T = -60^\circ\text{C}$ , дала значение РНП ~ 1.1 dB/km для той же дозы и продолжительности миссии, при этом точность экстраполяция в этом случае могла быть не столь высокой.

Таким образом, для космических применений ВС (в частности, для применений в волоконно-оптических гироскопах) нет необходимости проводить специальную оптимизацию технологических режимов изготовления преформ ВС с сердцевинной из нелегированного  $\text{SiO}_2$ . Исключение германия из сердцевины будет достаточно для того, чтобы использовать ВС длиной, по меньшей мере, 4–5 km в условиях вариации температуры в космосе в пределах  $-60^\circ\text{C}$  при максимальной дозе 1 kGy и длительности миссии 15 лет.

Экстраполяции РНП германосиликатных ВС — стандартного ВС для оптической связи SMF-28 и двулучепреломляющего ВС типа „ПАНДА“ — для случая 15-летней миссии, проведенной при  $T = +25^\circ\text{C}$  (доза 1 kGy) дали значения 4.3 и 17.5 dB/km соответственно.

РНП двулучепреломляющего ВС типа „ПАНДА“ с сердцевинной из нелегированного  $\text{SiO}_2$  в процессе релаксации после  $\gamma$ -облучения до дозы 1 kGy на  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  при  $T = +25^\circ\text{C}$  практически совпало с РНП в лучшем изотропном ВС, а при  $T = -60^\circ\text{C}$  оказались даже ниже. Это сравнение позволяет сделать вывод, что РНП к концу 15-летней миссии в данном двулучепреломляющем ВС будет не выше, чем в изотропных ВС. Таким образом, допустимо использование, по меньшей мере, 4–5 km данного двулучепреломляющего ВС в условиях вариации температуры в космосе в пределах  $\pm 60^\circ\text{C}$  при максимальной дозе 1 kGy и длительности миссии 15 лет.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации. Проект № RFMEFI60417X0183.

## Список литературы

- [1] Friebele E.J., Gingerich M.E., Griscom D.L. // SPIE Proc. 1992. Vol. 1791. P. 177–188.
- [2] Friebele E.J., Askins C.G., Miller G.A., Peelea J.R., Wasserman L.R. // SPIE Proc. 2004. Vol. 5554. P. 120–131.
- [3] Krabshuis G., Amezcua-Correa A., Gooijer F., Melin G., Kuyt G., Achten F.J., Geerings S.G.F., Bigot-Astruc M. // US Patent 9,405,062 B2 от 02.08.2016, приоритет от 26.04.2012.
- [4] Lydtin H. // J. Lightw. Technol. 1986. Vol. 4. N 8. P. 1034–1038.
- [5] Курбатов А.М., Курбатов Р.А. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 17. С. 23–29. [Kurbatov A.M., Kurbatov R.A. // Technic. Phys. Lett. 2010. Vol. 36. N 9. P. 789–791. DOI: 10.1134/S106378501009004X]
- [6] Курбатов А.М., Курбатов Р.А. // Патент РФ № 2472188. Приоритет от 02.04.2010. Зарегистрирован 10.01.2013.
- [7] Tomashuk A.L., Salgansky M.Yu., Kashaykin P.F., Khopin V.F., Sultangulova A.I., Nishchev K.N., Borisovsky S.E., Guryanov A.N., Dianov E.M. // J. Lightw. Technol. 2014. Vol. 32. N 2. P. 213–219.
- [8] Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Salgansky M.Yu., Abramov A.N., Nishchev K.N., Guryanov A.N., Dianov E.M. // J. Lightw. Technol. 2015. Vol. 33. N 9. P. 1788–1793.
- [9] Girard S., Marcandella C., Alessi A., Boukenter A., Ouerdane Y., Richard N., Paillet Ph., Gaillardin M., Raine M. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2012. Vol. 59. N 6. P. 2894–2901.
- [10] Griscom D.L. // J. Non-Cryst. Sol. 2006. Vol. 352. N 23. P. 2601–2617.
- [11] Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Salgansky M.Yu., Abramov A.N., Iskhakova L.D., Lobanov N.S., Nishchev K.N., Guryanov A.N., Dianov E.M. // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9507. P. 1–8.
- [12] Glavas X., Lembo L., Haraki W., Claxton Sh. // SPIE Proc. 1998. Vol. 3440. P. 120–130.
- [13] Friebele E.J., Askins C.G., Shaw C.M., Gingerich M.E., Harrington C.C., Griscom D.L., Tsai T., Paek U., Schmidt W.H. // Appl. Optic. 1991. Vol. 30. N 15. P. 1944–1957.
- [14] Lu Valle M.J., Friebele E.J., Dimarcello F.V., Miller G.A., Monberg E.M., Wasserman L.R., Wisk P.W., Yan M.F., Birtch E.M. // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6193.
- [15] McFadden J.D.O., Greenwell R., Hatch J., Barnes C., Pentrack D., Scott D. // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2811. P. 77–86.
- [16] Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Salgansky M.Yu., Guryanov A.N., Dianov E.M. // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 121. N 21. P. 213104.