

# НОВЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ 3-АМИНОПРОПИЛСИЛАТРАНА И СОРБЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО ИМИ СИЛИКАГЕЛЯ

© 2021 г. Е. Н. Оборина\*, С. Н. Адамович

Иркутский институт химии имени А. Е. Фаворского Сибирского отделения Российской академии наук,  
ул. Фаворского 1, Иркутск, 664033 Россия  
\*e-mail: oborina@irioch.irk.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2021 г.  
После доработки 12 апреля 2021 г.  
Принято к печати 25 апреля 2021 г.

Взаимодействием 3-аминопропилсилатрана с мочевиной, тиомочевиной, гуанидином, ацетамидом, ацетилгуанидином и аминогуанидином синтезированы новые функционализированные силатраны. Полученные силатраны были использованы для модификации силикагеля. Исследована сорбционная активность модифицированного силикагеля к ионам редкоземельных элементов  $Ce^{3+}$  и  $Tb^{3+}$ .

**Ключевые слова:** 3-аминопропилсилатран, мочевины, тиомочевина, гуанидин, силикагель, сорбция

**DOI:** 10.31857/S0044460X21120106

Ранее реакцией органилтриалкоксисиланов с мочевиной, тиомочевиной, гуанидином и аминогуанидином были получены карбофункциональные кремнийорганические мономеры  $R(CH_2)_3Si(OAlk)_3$  и полимеры (силесквиоксаны)  $[RSiO_{1.5}]_n$ . Такие соединения или модифицированные ими носители (цеолиты, слюда, бумага и др.) зарекомендовали себя в качестве ионитов, комплексообразующих агентов и эффективных сорбентов тяжелых и благородных металлов [1–4]. Недостатком этих модифицированных сорбентов является высокая неравномерность и неоднородность покрытия.

1-Органилсилатраны  $RSi(OCH_2CH_2)_3N$  ( $R = H, Alk, Ag$  и др.) – это широко известный класс трициклических соединений пентакоординированного кремния (схема 1) [5–11].

В 1963 г. М.Г. Воронковым была открыта высокая физиологическая активность силатранов [5].

Было показано, что она определяется уникальной атрановой структурой и природой заместителя у атома кремния. Некоторые силатраны нашли применение, например, в сельском хозяйстве и медицине [7, 9, 11]. Кроме того, 1-органилсилатраны в последнее время стали успешно использоваться для модификации поверхностей. Так, 3-аминопропилсилатран, 3-меркаптопропилсилатран и их производные, в отличие от исходных 3-аминопропил- и 3-меркаптопропилтриалкоксисиланов, при

Схема 1.

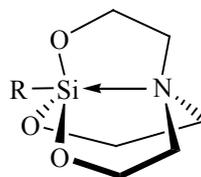
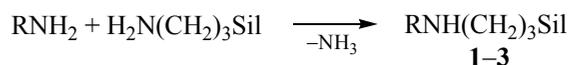


Схема 2.



R = CH<sub>3</sub>CO (**1**), CH<sub>3</sub>CONHC(=NH) (**2**), H<sub>2</sub>NNHC(=NH) (**3**); SiI = Si(OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>N.

Схема 3.



R = C(=NH) (**4**), C(=O) (**5**), C(=S) (**6**); SiI = Si(OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>N.

мягком гидролизе образуют морфологически ровные, стабильные, функциональные монослои на металлах, стекле, полимерах и хлопке. Такие материалы могут применяться для производства нелиняющих тканей, противообрастающих покрытий, гибких схем и биосенсоров, а их металлокомплексы могут использоваться в гетерогенном катализе [12–16]. По нашему мнению, эти материалы могут быть использованы в качестве эффективных сорбентов (энтеросорбентов, гемосорбентов) тяжелых, токсичных металлов, а также радиоактивных и редкоземельных элементов.

В продолжение исследований [1, 2, 8–10] нами получены новые производные 3-аминопропилсилатрана и изучены сорбционные свойства модифицированного ими силикагеля по отношению к ионам редкоземельных элементов Ce(III) и Tb(III). Реакцией 3-аминопропилсилатрана с ацетамидом, ацетилгуанидином и аминугуанидином (1:1), со-

держащими при атоме углерода одну реакционно-способную аминогруппу, получены силатраны **1–3** (схема 2). При взаимодействии 3-аминопропилсилатрана с гуанидином, мочевиной и тиомочевиной (2:1), имеющими две активные группы NH<sub>2</sub>, синтезированы силатраны **4–6** (схема 3). Условия реакций приведены в табл. 1.

Целевые силатраны выделяли в виде порошкообразных веществ с умеренными и хорошими выходами (35–75%). Из табл. 1 видно, что лучшие выходы силатранов **1–6** были достигнуты в случае нагревания (сплавления) реагентов при 120°C при микроволновом облучении.

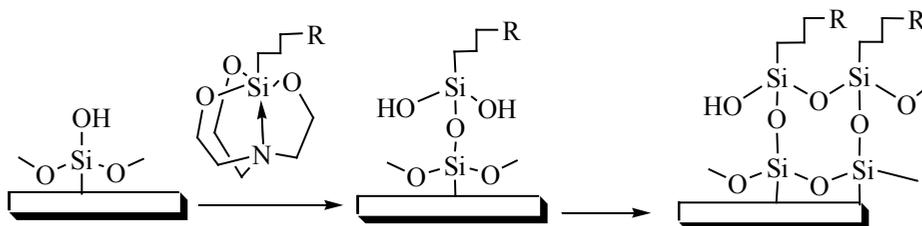
Силатраны **1–6** были иммобилизованы на силикагель Alfa Aesar (215–400 меш) согласно методике [17]. Полученные образцы **1а–6а** были изучены в качестве адсорбентов редкоземельных элементов церия и тербия.

Таблица 1. Условия проведения синтеза силатранов **1–6**

№	T, °C	τ, ч	Растворитель	Выход, %
<b>1</b>	100	5	–	35
<b>2</b>	100	5	–	40
<b>2</b>	65	5	Метанол	40
<b>2<sup>а</sup></b>	80	3	Этанол	45
<b>2<sup>а</sup></b>	120	1	–	75
<b>3<sup>а</sup></b>	120	1	–	70
<b>4<sup>а</sup></b>	120	1	–	75
<b>5</b>	120	1	–	45
<b>5<sup>а</sup></b>	120	1	–	75
<b>6<sup>а</sup></b>	120	1	–	75

<sup>а</sup> Реакцию проводили в условиях микроволнового излучения.

Схема 4.



Модификация поверхности силикагеля, очевидно, является результатом взаимодействия между силатраном и гидроксильными группами силикагеля и, вероятно, включает несколько стадий: (1) реакцию гидролиза силатрана, приводящую к выбросу триэтаноламина и образованию соответствующего силанола  $(\text{HO})_3\text{Si}(\text{CH}_2)_3\text{R}$ ; (2) реакцию конденсации силанола с гидроксильной группой силикагеля, приводящую к образованию силанольного интермедиата; (3) реакцию конденсации следующей молекулы силанола как с гидроксильной группой интермедиата, так и с OH-группой силикагеля, ведущую к образованию цепей  $-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$ . В результате, не исключается вероятность образования на поверхности силикагеля самосборных функциональных силоксановых слоев/пленок (схема 4).

Сорбционное концентрирование редкоземельных элементов (РЗЭ) в последние годы приобретает большое значение [18]. Выбор РЗЭ в качестве сорбатов обусловил наличие в карбофункциональных группах полученных силатранов атомов азота, кислорода и серы – наиболее предпочтительных центров координации редкоземельных элементов [19].

Исследование сорбции образцов **1a–6a** проводили в хлоридных растворах статическим методом на примере  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$  – представителей цериевой и иттриевой подгрупп РЗЭ соответственно. Содержание элементов в растворе определяли спектрофотометрическим методом с применением 8-оксихинолина [20]. Значения статической сорбционной емкости (ССЕ) образцов **1a–6a** по отношению к ионам тербия и церия представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что соединения имеют относительно высокие значения статической сорбционной емкости, 89–201 мг/г. Для сравнения, в

табл. 2 указана статическая сорбционная емкость соответствующих силанов, полученных нами ранее [1]. Очевидно, что образцы силикагеля **1a–6a**, модифицированные силатранами проявляют более высокую сорбционную емкость. Это, вероятно, связано с улучшением качества модификации. Наибольшую эффективность по отношению к исследованным ионам  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$  проявил образец **4a**, содержащий гуанидиновый фрагмент.

Также была исследована зависимость статической сорбционной емкости образцов **1a–6a** от времени (рис. 1). Из полученных данных следует, что сорбция достигает равновесия в среднем за 60 мин, далее происходит уменьшение статической сорбционной емкости.

Комплексообразование образцов **1a–6a** с ионами  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$  реализуется, вероятно, за счет хелатного взаимодействия с участием групп NH и C=X (схема 5).

Предполагаемую структуру комплексов **1a–6a** с ионами РЗЭ подтверждают данные ИК спектро-

**Таблица 2.** Статическая сорбционная емкость образцов **1a–6a** по отношению к ионам  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$  <sup>a</sup>

Сорбент	ССЕ, мг/г <sup>a</sup>	
	$\text{Ce}^{3+}$	$\text{Tb}^{3+}$
<b>1a</b>	176 (153)	189 (161)
<b>2a</b>	103 (91)	127 (102)
<b>3a</b>	68 (60)	89 (75)
<b>4a</b>	183 (152)	201 (170)
<b>5a</b>	99 (80)	117 (95)
<b>6a</b>	147 (126)	163 (148)

<sup>a</sup> В скобках указаны значения статической сорбционной емкости соответствующих силанов, полученных ранее [1].

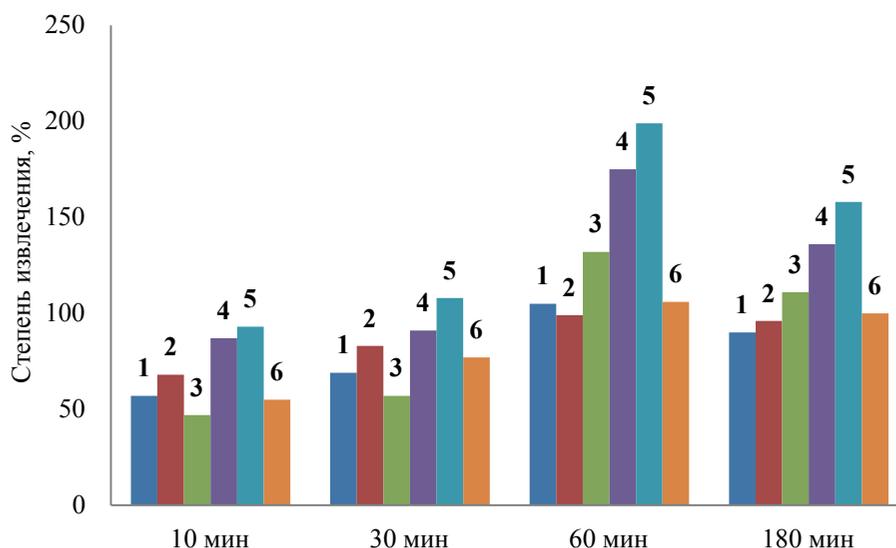
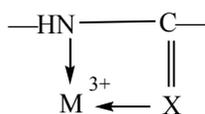


Рис. 1. Зависимости сорбционной емкости соединений 1а–6а от времени.

Схема 5.



X = O, S, NH.

скопии. Так, в спектрах всех образцов после насыщения ионами  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$  наблюдается изменение интенсивности и гипсохромный сдвиг (на 20 и  $100 \text{ cm}^{-1}$ ) полос поглощения групп  $\text{C}=\text{X}$  и  $\text{NH}$  соответственно.

Таким образом, на основе реакции 3-аминопропилсилатрана с (тио)мочевинной, гуанидином и его производными синтезированы новые функционализированные силатраны. Показано, что образцы силикагеля, модифицированные полученными силатранами, проявляют более высокую сорбционную емкость, чем образцы, модифицированные соответствующими силанами. Этот факт, указывает на перспективность выбранного пути модификации поверхностей и требует дальнейшего развития.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Спектры ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  ( $\text{D}_2\text{O}$ ) регистрировали на спектрометре Bruker DPX-400. Внутренний стан-

дарт – ТМС. ИК спектры записывали на ИК спектрометре Bruker IFS-25 в области  $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$ . Температуры плавления определяли на приборе Micro-Hot-Stage Poly Term A.

#### Общая методика синтеза силатранов 1–6.

Смесь 3-аминопропилсилатрана и ацетамида, ацетилгуанидина или амингуанидина (соотношение 1:1), или смесь 3-аминопропилсилатрана и гуанидина, мочевины или тиомочевины (соотношение 2:1) нагревали в присутствии или в отсутствие растворителя (см. табл. 1) при  $65\text{--}120^\circ\text{C}$  в течение 1–5 ч. Растворитель (если он применялся) отгоняли, твердый остаток перекристаллизовывали из хлороформа.

**N-[3-(2,8,9-Триокса-5-аза-1-силабицикло[3.3.3]ундец-1-ил)пропил]ацетамид (1).** Выход 35 %, бесцветный порошок, т. пл.  $128^\circ\text{C}$ . ИК спектр,  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ : 1658 ( $\text{C}=\text{O}$ ), 3060 ( $\text{NH}$ ). Спектр ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м. д.: 0.42 м (2H,  $\text{SiCH}_2$ ), 1.36 м (2H,  $\text{CH}_2$ ), 1.76 с (3H,  $\text{CH}_3$ ), 2.50 т (6H,  $\text{NCH}_2$ ,  $J$  5.6 Гц), 2.93 м (2H,  $\text{CH}_2$ ), 3.45 т (6H,  $\text{OCH}_2$ ,  $J$  5.6 Гц). Найдено, %: C 48.15; H 8.08; N 10.20.  $\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{N}_2\text{O}_4\text{Si}$ . Вычислено, %: C 48.19; H 8.71; N 10.23.

**N-(Имино{[3-(2,8,9-триокса-5-аза-1-силабицикло[3.3.3]ундец-1-ил)пропил]амино}метил)ацетамид (2).** Выход 75%, бесцветный порошок,

т. пл. 132°C. ИК спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 1555 (C=N), 1657 (C=O), 2944 (NH). Спектр ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м. д.: 0.43 м (2H, SiCH<sub>2</sub>), 1.60 м (2H, CH<sub>2</sub>), 1.93 с (3H, CH<sub>3</sub>), 2.61 м (2H, CH<sub>2</sub>), 2.82 т (6H, NCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц), 3.77 т (6H, OCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц). Спектр ЯМР  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta_{\text{C}}$ , м. д.: 13.13 (SiCH<sub>2</sub>), 23.32 (CH<sub>2</sub>), 23.97 (CH<sub>3</sub>), 43.32 (CH<sub>2</sub>N), 50.93 (NCH<sub>2</sub>), 57.59 (OCH<sub>2</sub>), 169.70 (C=O). Найдено, %: С 45.84; Н 7.64; N 17.70. C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>Si. Вычислено, %: С 45.99; Н 7.31; N 17.76.

**N,2-Бис[3-(2,8,9-триокса-5-аза-1-силабицикло[3.3.3]ундец-1-ил)пропил]гидразинкарбоксимид (3).** Выход 70%, бесцветный порошок, т. пл. 120°C. ИК спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 1640 (C=N), 2934 (NH). Спектр ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м. д.: 0.52 м (2H, SiCH<sub>2</sub>), 1.62 м (2H, CH<sub>2</sub>), 2.62 м (2H, CH<sub>2</sub>), 2.84 т (6H, NCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц), 3.56 т (6H, OCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц). Спектр ЯМР  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta_{\text{C}}$ , м. д.: 9.40 (SiCH<sub>2</sub>), 21.06 (CH<sub>2</sub>), 41.70 (CH<sub>2</sub>N), 55.35 (NCH<sub>2</sub>), 58.51 (OCH<sub>2</sub>), 164.02 (C=O). Найдено, %: С 45.21; Н 7.98; N 16.65. C<sub>19</sub>H<sub>40</sub>N<sub>6</sub>O<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>. Вычислено, %: С 45.56; Н 7.69; N 16.58.

**N,N'-Бис[3-(2,8,9-триокса-5-аза-1-силабицикло[3.3.3]ундец-1-ил)пропил]гуанидин (4).** Выход 75%, бесцветный порошок, т. пл. 139°C. ИК спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 1667 (C=N), 3158 (NH). Спектр ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м. д.: 0.39 м (4H, SiCH<sub>2</sub>), 1.49 м (4H, CH<sub>2</sub>), 2.64 т (12H, NCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц), 2.80 м (4H, CH<sub>2</sub>), 3.50 т (12H, OCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц). Найдено, %: С 46.59; Н 8.02; N 14.30. C<sub>19</sub>H<sub>39</sub>N<sub>5</sub>O<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>. Вычислено, %: С 46.79; Н 7.91; N 14.46.

**N,N'-Бис[3-(2,8,9-триокса-5-аза-1-силабицикло[3.3.3]ундец-1-ил)пропил]мочевина (5).** Выход 75%, бесцветный порошок, т. пл. 131°C. ИК спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 1627 (C=O), 3201 (NH). Спектр ЯМР  $^1\text{H}$  (CD<sub>3</sub>OD),  $\delta$ , м. д.: 0.064 м (4H, SiCH<sub>2</sub>), 1.25 м (4H, CH<sub>2</sub>), 2.53 т (12H, NCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц), 2.76 м (4H, CH<sub>2</sub>), 3.56 т (12H, OCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц). Спектр ЯМР  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta_{\text{C}}$ , м. д.: 13.40 (SiCH<sub>2</sub>), 24.59 (CH<sub>2</sub>), 49.37 (CH<sub>2</sub>N), 55.22 (NCH<sub>2</sub>), 5842 (OCH<sub>2</sub>), 161.10 (C=O). Найдено, %: С 46.50; Н 7.80; N 11.41. C<sub>19</sub>H<sub>38</sub>N<sub>4</sub>O<sub>7</sub>Si<sub>2</sub>. Вычислено, %: С 46.79; Н 7.61; N 11.56.

**N,N'-Бис[3-(2,8,9-триокса-5-аза-1-силабицикло[3.3.3]ундец-1-ил)пропил]тиомочевина (6).** Выход 75%, бесцветный порошок, т. пл. 118°C. ИК спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 1602 (C=S), 3210 (NH). Спектр ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м. д.: 0.37 м (4H, SiCH<sub>2</sub>), 1.46 м (4H,

CH<sub>2</sub>), 2.50 т (12H, NCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц), 2.65 м (4H, CH<sub>2</sub>), 3.45 т (12H, OCH<sub>2</sub>,  $J$  5.6 Гц). Найдено, %: С 45.03; Н 7.55; N 11.05. C<sub>19</sub>H<sub>38</sub>N<sub>4</sub>O<sub>6</sub>SSi<sub>2</sub>. Вычислено, %: С 45.19; Н 7.31; N 11.26.

**Получение образцов силикагеля, функционализированного силатранами 1–6.** Процедуру проводили способом, погружения силикагеля в раствор подобно методике [17]. Силикагель Alfa Aesar (215–400 меш) активировали при 100°C в течение 8 ч, затем помещали в толуольный раствор силатрана 1–6 (10 мл, 50 ммоль). Смесь кипятили в течение 15 ч, охлаждали и фильтровали. Остаток промывали толуолом, этанолом, и диэтиловым эфиром. Бесцветный порошок сушили при 75°C в течение 3 ч. Получали образцы модифицированного силикагеля 1а–6а.

**Определение сорбционной активности образцов 1а–6а.** Стандартные растворы с концентрацией 1 мг/мл готовили из солей Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> и Tb(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>. Навеску функционализированного силикагеля 1а–6а массой 50 мг помещали в 50 мл раствора соли соответствующего металла в 1 М. соляной кислоте и интенсивно перемешивали. Время сорбции варьировали от 10 мин до 3 ч, содержание иона металла варьировали в интервале 0.05–0.8 мг/мл. По окончании опыта образец 1а–6а отделяли от раствора фильтрованием, промывали на фильтре дистиллированной водой. Раствор объединяли с промывными водами и определяли в нем остаточное содержание извлекаемого элемента спектрофотометрическим методом [21].

Степень сорбции (%) рассчитывали по формуле (1).

$$Q = [(c_0 - c_1)/c_0] \times 100\%. \quad (1)$$

Здесь  $c_0$  и  $c_1$  – содержание сорбируемого элемента в растворе до и после сорбции соответственно, мг/мл.

Измерение оптической плотности растворов осуществляли с помощью фотоколориметра КФК-2. Сорбционную емкость образца (CCE) – максимальное количество элемента, которое может сорбироваться единицей массы образца в условиях насыщения, рассчитывали по формуле (2).

$$\text{CCE} = (c_0 - c_1)V/m. \quad (2)$$

Здесь  $c_0$  – начальная концентрация элемента в растворе, мг/мл;  $c_1$  – конечная концентрация элемента в растворе при условии полного насыщения им взятой навески образца, мг/мл;  $V$  – объем раствора, мл;  $m$  – масса образца, г.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Адамович Сергей Николаевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1276-924X>

#### ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Иркутской области (проект № 20-43-380001) с использованием оборудования Байкальского аналитического центра коллективного пользования Сибирского отделения РАН.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власова Н.Н., Оборина Е.Н., Григорьева О.Ю., Воронков М.Г. // Усп. хим. 2013. Т. 85. № 5. С. 449; Vlasova N.N., Oborina E.N., Grigoryeva O.Yu., Voronkov M.G. // Russ. Chem. Rev. 2013. Vol. 82. N 5. P. 449. doi 10.1070/RC2013v082n05ABEH004301
2. Vlasova N.N., Sorokin M.S., Oborina E.N. // Appl. Organometal. Chem. 2017. Vol. 31. P. e3668. doi 10.1002/aoc.3668
3. Qiao B., Gao H., Wang T., Jin Y. // CIESC Journal. 2014. Vol. 65. N 7. P. 2629. doi 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.07.022
4. Kim W., Casalme L.O., Umezawa T., Matsuda F., Ootomo R., Kamiya Y. // Chem. Lett. 2020. Vol. 49. P. 71. doi 10.1246/cl.190773
5. Воронков М.Г., Дьяков В.М. Силатраны. Новосибирск: Наука, СО РАН, 1978. 204 с.
6. Voronkov M.G., Dyakov V.M., Kirpichenko S.V. // J. Organomet. Chem. 1982. Vol. 233. P. 1. doi 10.1016/S0022-328X(00)86939-9
7. Puri J.K., Singh R., Chahal V.K. // Chem. Soc. Rev. 2011. Vol. 40. P. 1791. doi 10.1039/b925899j
8. Vlasova N.N., Sorokin M.S., Oborina E.N. // Appl. Organomet. Chem. 2017. Vol. 31. P. e3668. doi 10.1002/aoc.3668
9. Adamovich S.N. // Appl. Organomet. Chem. 2019. Vol. 33. P. e4940. doi 10.1002/aoc.4940
10. Adamovich S.N., Kondrashov E.V., Ushakov I.A., Shatokhina N.S., Oborina E.N., Vashchenko A.V., Belovezhets L.A., Rozentsveig I.B., Verpoort F. // Appl. Organomet. Chem. 2020. Vol. 34. P. e5976. doi 10.1002/aoc.5976
11. Воронков М.Г., Барышюк В.П. Силатраны в медицине и сельском хозяйстве. Новосибирск: СО РАН, 2005. 255 с.
12. Chen W.-H., Tseng Y.-T., Hsieh S., Liu W.-C., Hsieh C.-W., Wu C.-W., Huang C.-H., Lin H.-Y., Chen C.-W., Linb P.-Y., Chau L.-K. // RSC Adv. 2014. Vol. 4. P. 46527. doi 10.1039/C4RA05583G
13. Materna K.L., Brennan B.J., Brudvig G.W. // Dalton Trans. 2015. Vol. 44. P. 20312. doi 10.1039/c5dt03463a
14. Tseng Y.-T., Lu H.-Y., Li J.-R., Tung W.-J., Chen W.-H., Chau L.-K. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2016. Vol. 49. P. 34159. doi 10.1021/acsami.6b13926
15. Singh H., Singh R., Kaur V. // Cellulose. 2019. Vol. 26. P. 2885. doi 10.1007/s10570-019-02293-4
16. Huang C.-J., Zheng Y.-Y. // Langmuir. 2019. Vol. 35. P. 1662. doi 10.1021/acs.langmuir.8b01981
17. Spennato R., Menu M.-J., Dartiguenave M., Dartiguenave Y. // Trans. Met. Chem. 2004. Vol. 29. P. 830. doi 10.1007/s11243-004-1564-y
18. Цизин Г.И., Золотов Ю.А. // ЖАХ. 2002. Т. 57. С. 678; Tsizin G.I., Zolotov Y.A. // J. Anal. Chem. 2002. Vol. 57. P. 562. doi 10.1023/A:1016265631350
19. Киселёв Ю.М. Химия координационных соединений. М.: Юрайт, 2014. 657 с.
20. Сафиулина А.М., Синегрибова О.А., Баулин В.Е., Тананаев И.Г., Цивадзе А.Ю. // Цветные металлы. 2012. № 3. С. 43.
21. Луцкий Д.С., Олейник А.О. // Современные инновации. 2016. № 4. С. 8.

# New 3-Aminopropylsilatrane Derivatives and Sorption Activity of the Silica Gel Modified by Them

E. N. Oborina\* and S. N. Adamovich

*Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia*  
*\*e-mail: oborina@irioch.irk.ru*

Received April 12, 2021; revised April 12, 2021; accepted April 25, 2021

New functionalized silatranes were synthesized by the reaction of 3-aminopropylsilatrane with urea, thiourea, guanidine, acetamide, acetylguanidine, and aminoguanidine. The obtained silatranes were used to modify silica gel. The sorption activity of the modified silica gel towards the ions of the rare-earth elements  $Ce^{3+}$  and  $Tb^{3+}$  was studied.

**Keywords:** 3-aminopropylsilatrane, urea, thiourea, guanidine, silica gel, sorption