



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13426

Синтез и ВЭЖХ/МС-исследование производных 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримиди- нола из растительных масел

**Алексей Александрович Кружилин[✉], Иван Александрович Дмитриев,
Михаил Андреевич Потапов, Хидмет Сафарович Шихалиев**

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, kruzhilin.alexey@gmail.com[✉]

Аннотация. В работе представлены результаты синтеза и анализа производных 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов, полученных из подсолнечного, пальмового и кокосового масел. Синтетический подход включал стадию получения аминотриазолов и их дальнейшую конденсацию с коричным альдегидом в присутствии амфотерного поверхностно-активного вещества. Для установления состава и структуры реакционных смесей был использован метод ВЭЖХ/МС высокого разрешения с ионизацией электрораспылением. Показано, что распределение целевых продуктов коррелирует с жирнокислотным профилем исходного масла: для подсолнечного масла доминируют производные линолевой кислоты (59.41%), для пальмового – пальмитиновой (52.67%), для кокосового – лауриновой (43.51%). Отмечено присутствие побочных соединений (3-8%), обусловленных неполной циклизацией, автоконденсацией альдегидов, а также спецификой получения 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов без выделения (обусловлено сферой применения данных продуктов в качестве ингибиторов кислотной коррозии стали). Полученные результаты подтверждают перспективность использования возобновляемого растительного сырья для целенаправленного синтеза гетероциклических соединений с потенциальной ингибирующей активностью в отношении кислотной коррозии металлов.

Ключевые слова: ВЭЖХ/МС; жирные кислоты; подсолнечное масло; пальмовое масло; кокосовое масло; триазолопиримидины; производные триазола; зелёная химия; ингибиторы коррозии

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-23-00457, <https://rscf.ru/project/24-23-00457/>).

Для цитирования: Кружилин А.А., Дмитриев И.А., Потапов М.А., Шихалиев Х.С. Синтез и ВЭЖХ/МС-исследование производных 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидинола из растительных масел // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 5. С. 715-722. [https://doi.org/ 10.17308/sorpchrom.2025.25/13426](https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13426)

Original article

Synthesis and HPLC/MS Investigation of 2-Alkyl-5-Phenyl-4,5,6,7-Tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidinol Derivatives from Vegetable Oils

Alexey A. Kruzhilin[✉], Ivan A. Dmitriev, Mikhail A. Potapov, Khidmet S. Shikhaliev

Voronezh state university, Voronezh, Russian Federation, kruzhilin.alexey@gmail.com[✉]

Abstract. This work presents the synthesis and analysis of 2-alkyl-5-phenyl-4,5,6,7-tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidin-7-ol derivatives obtained from sunflower, palm, and coconut oils. The synthetic approach included the preparation of aminotriazoles followed by their condensation with cinnamaldehyde in the presence of an amphoteric surfactant. The composition and structure of the reaction mixtures were established using

high-resolution HPLC/ESI-MS. It was shown that the distribution of the target products correlates with the fatty acid profile of the starting oil: linoleic acid derivatives dominated in sunflower oil (59.41%), palmitic acid derivatives in palm oil (52.67%), and lauric acid derivatives in coconut oil (43.51%). The presence of side products (3-8%) was observed, attributed to incomplete cyclization, aldehyde self-condensation, and the specifics of obtaining 2-alkyl-5-phenyl-4,5,6,7-tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidin-7-ols without isolation (motivated by the intended use of these products as acid corrosion inhibitors for steel). The results confirm the potential of using renewable plant-based raw materials for the targeted synthesis of heterocyclic compounds with potential inhibitory activity against metal acid corrosion.

Keywords: HPLC/MS; fatty acids; sunflower oil; palm oil; coconut oil; triazolopyrimidines; triazole derivatives; green chemistry; corrosion inhibitors

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 24-23-00457, <https://rscf.ru/project/24-23-00457/>)

For citation: Kruzhilin A.A., Dmitriev I.A., Potapov M.A., Shikhaliev Kh.S. Synthesis and HPLC/MS Investigation of 2-Alkyl-5-Phenyl-4,5,6,7-Tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidinol Derivatives from Vegetable Oils. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(5): 715-722. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13426>

Введение

В настоящее время увеличение объемов добычи на нефтяных месторождениях является одним из ключевых направлений развития нефтедобывающей промышленности. Особенно перспективными для применения новых технологий интенсификации добычи являются карбонатные коллекторы, где выработка и коэффициент извлечения нефти относительно низки. Среди методов воздействия на призабойную зону скважин в таких коллекторах наиболее распространены солянокислотные технологии, которые играют важную роль в увеличении добычи нефти [1-2]. Однако использование соляной кислоты может вызвать коррозию металлов и растрескивание трубопроводов под напряжением. Для предотвращения этих проблем в раствор соляной кислоты добавляют ингибиторы коррозии. В последнее время усилились исследования по поиску и синтезу экологически чистых и безвредных соединений природного происхождения, которые могут быть использованы в качестве таких антикоррозионных агентов. В качестве подобных добавок используются разнообразные соединения: как органические, так и неорганические [3].

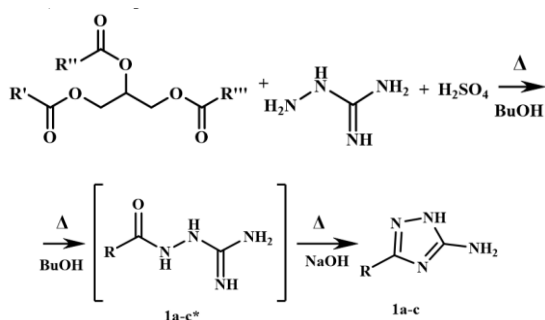
Растительные масла (касторовое, пальмовое, соевое, подсолнечное и др.) служат сырьём для извлечения жирных кислот (олеиновая, стеариновая, линолевая и

др.), которые модифицируются в эффективные ингибиторы. Химическая модификация жирных кислот позволяет получать ингибиторы коррозии таких классов, как сложные эфиры для защиты в HCl и нефтеводных средах, этоксилаты, оксидиазолы/триазоламины и амидоамины, а также аммонийные соли триэтаноламина в качестве ингибиторов кислотных сред (HCl и H₂SO₄), имидазолины для защиты в солевых растворах NaCl. Согласно литературным данным, наряду с высокой антикоррозионной эффективностью, такие ингибиторы обладают рядом преимуществ: они являются биоразлагаемыми, нетоксичными (в сравнении с известными ингибиторами), а их производство более экономично, так как используется возобновляемое сырьё низкой стоимости [4].

В рамках наших предыдущих исследований [5-6] было выявлено неожиданное ингибирующее действие продуктов реакции между 3-алкил-5-амино-1H-1,2,4-триазолами и коричневым альдегидом, проявляющих высокую ингибирующую активность в отношении коррозии стали Ст3 в солянокислой среде. составов смесей 4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-a]пиримидин-7-олов, получаемых из подсолнечного, пальмового и кокосового масел с применением универсального инструмента для определения состава реакционной смеси – высокоэффективной жидкостной хроматографии в

сочетании с масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС).

Экспериментальная часть

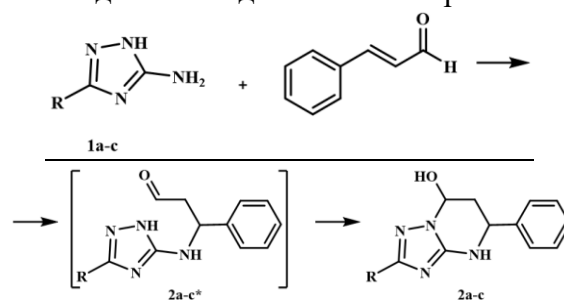


R', R'', R''' : остатки жирных кислот подсолнечного (а), пальмового (b), кокосового (с) масел

Общая методика синтеза 3-замещенных 5-амино-1H-1,2,4-триазолов (1a-c). К раствору ~0.1 моль масла (эквивалентное количество рассчитано по числу омыления) в 100 мл бутанола при перемешивании осторожно добавляли 1 см³ серной кислоты. После этого порционно добавляли к смеси 0.3 моль (40.8 г) аминугуанидинбикарбоната. Смесь подогрели до 90-95°C (наблюдали выделение углекислого газа) и кипятили с насадкой Дина-Старка и обратным холодильником, снабженным хлоркальциевой трубкой, в течение ~20 часов. По истечении этого времени в реакционную массу вносили 2 г едкого натра и продолжали кипячение в течение еще 5 часов для циклизации образованного интермедиата 1a-c*. Завершение протекания реакции фиксировали по количеству отделившейся воды в ловушке Дина-Старка (~3.5 см³). Смесь охлаждали, полученную смесь триазолов промывали водой и экстрагировали в системе бутанол-вода, удаляя водную фракцию 3 раза, органическую фракцию сушили над сульфатом натрия, после чего упаривали на роторном испарителе.

Общая методика синтеза производных 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-a]пиримидин-7-олов (2a-c). Смесь 0.1 моль коричневого альдегида и ~0.1 моль смеси аминотриазолов 1a-c в среде амфотерного ПАВ (40 мас.% от общей массы реагентов) выдерживали

при температуре 80-85°C в течение 15 минут. Смесь остужали и исследовали без выделения и дальнейшей обработки.



R: остатки жирных кислот подсолнечного (а), пальмового (b), кокосового (с) масел

Хромато-масс-спектрометрический анализ. Колонка Zorbax Extend-C18 (Rapid Resolution HT 2.1 x 50 мм; 1.8 мкм) в комплексе Agilent 1260 Infinity (Agilent Technologies, CA, USA). Подвижная фаза - ацетонитрил (А) - вода (В) + 0.1% муравьиной кислоты. Градиентное смешение растворителей. Начало – 50% (А) в течение 0.5 мин, затем, 50-95% (А) за 6.5 мин, и ещё 1.5-2 минуты при 95% (А). Температура термостата колонок 30°C. Объем инжектируемой пробы 1 мкл. Скорость 0.4 см³/мин. Элюат вводили непосредственно в ESI-MS, детектор Agilent 6230 TOF LC/MS (времяпролётный, ионизация - электроспрей). Запись и регистрацию сигналов проводили в положительной полярности; небулайзер (N₂) 20 psig; газ-осушитель (N₂), 6 см³/мин, 320°C; шкала определяемых масс 50-3200 m/z. Напряжение на капилляре -4000 В; фрагментор +191 В, скиммер +66 В, OctRF 750 В.

Обсуждение результатов

Смесь 1,2,4-аминотриазолов на основе растительных масел была получена реакцией соответствующего растительного масла с бикарбонатом аминугуанидина. Для этого масло подвергали гидролизу в присутствии серной кислоты. Образующиеся в результате *in situ* жирные кислоты вступают во взаимодействие с аминугуанидином. В результате на первой стадии образуются 2-алкилгидразин-1-карбоксимидамиды 1a-c*, далее они циклизуются в среде щелочи до целевых

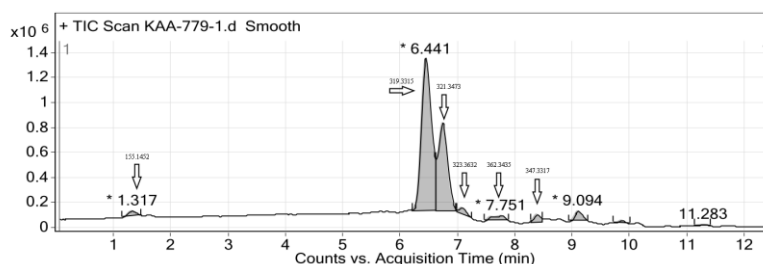


Рис. 1. Хроматограмма полного ионного тока реакционной смеси 1,2,4-аминотриазолов жирных кислот подсолнечного масла 1a

Fig. 1. Chromatogram of the total ion current of the reaction mixture of 1,2,4-aminotriazoles of sunflower oil fatty acids 1a

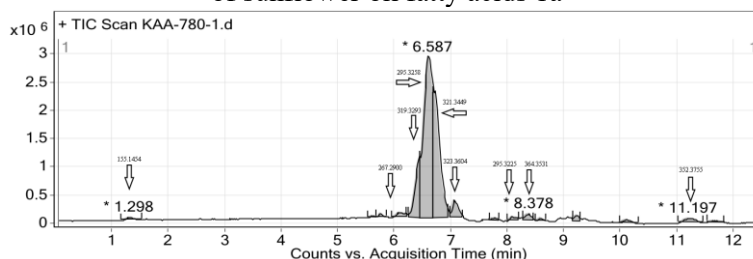


Рис. 2. Хроматограмма полного ионного тока реакционной смеси 1,2,4-аминотриазолов жирных кислот пальмового масла 1b

Fig. 2. Chromatogram of the total ion current of the reaction mixture of 1,2,4-aminotriazoles of palm oil fatty acids 1b

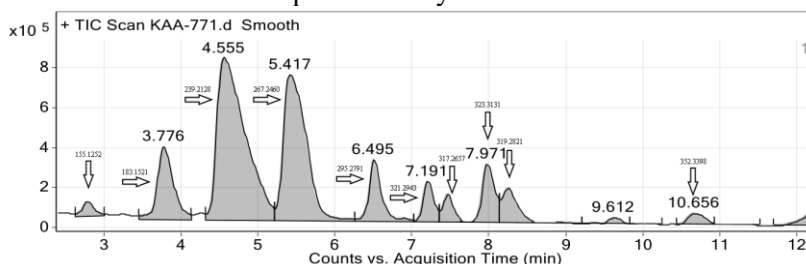


Рис. 3. Хроматограмма полного ионного тока реакционной смеси 1,2,4-амино-триазолов жирных кислот кокосового масла 1c

Fig. 3. Chromatogram of the total ion current of the reaction mixture of 1,2,4-aminotriazoles of fatty acids of coconut oil 1c

1,2,4-аминотриазолов 1a-с. Выход составил >95%.

С применением метода ВЭЖХ/МС был установлен состав полученных смесей аминотриазолов 1a-с (табл. 1, рис. 1-3). Основными признаками обнаружения исследуемых производных на хроматограмме можно считать наличие нескольких характерных или базовых пиков и, в первую очередь, наличие устойчивого молекулярного иона $[M^+]$.

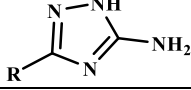
Полученные смеси 1,2,4-аминотриазолов (1a-с) были подвергнуты дальнейшему превращению с коричневым альдегидом в соответствии с ранее описанной методикой [5]. Процесс проводили путем

нагревания смеси, содержащей 0.1 моль коричневого альдегида и ~0.1 моль смеси аминотриазолов, в среде амфотерного поверхностно-активного вещества при температуре 80-85°C в течение 15 минут.

В ходе данной реакции 1,2,4-триазолы вступают в процесс превращения, который включает две последовательные стадии. Первая стадия представляет собой присоединение экзоциклической аминогруппы по кратной связи по механизму Михаэля. На второй стадии происходит внутримолекулярная циклизация, сопровождающаяся нуклеофильным присоединением к карбонильной группе. В резуль-

Таблица 1. Сводные результаты ВЭЖХ/МС анализа смесей аминотриазолов жирных кислот подсолнечного (1a), пальмового (1b) и кокосового (1c) масел

Table 1. Summary of HPLC results/MS analysis of mixtures of aminotriazoles of fatty acids of sunflower (1a), palm (1b) and coconut (1c) oils

	1a		1b		1c	
	RT, мин	м.д., %	RT, мин	м.д., %	RT, мин	м.д., %
R = C ₅ H ₁₁	1.317	1.71	1.298	0.28	2.782	2.27
R = C ₇ H ₁₅	—	—	—	—	3.859	3.84
R = C ₁₁ H ₂₃	—	—	—	—	4.572	46.30
R = C ₁₃ H ₂₇	—	—	6.090 5.758	1.55 0.62	5.551	16.40
R = C ₁₅ H ₃₁	—	—	6.587	49.92	6.496	9.01
R = C ₁₇ H ₃₃	6.723	29.91	6.720	27.52	7.192	3.50
R = C ₁₇ H ₂₉	—	—	8.079	0.97	7.457	2.50
R = C ₁₇ H ₃₅	7.071	1.81	7.051	3.70	7.988	6.35
R = C ₁₇ H ₃₁	6.441	57.88	6.438	11.22	8.452	2.83
R = C ₁₉ H ₃₅	8.381	2.27	8.378	1.54	—	—
R = C ₂₀ H ₄₁	7.751	2.50	11.197	1.19	10.640	0.21
Примеси		3.92		1.49		6.79

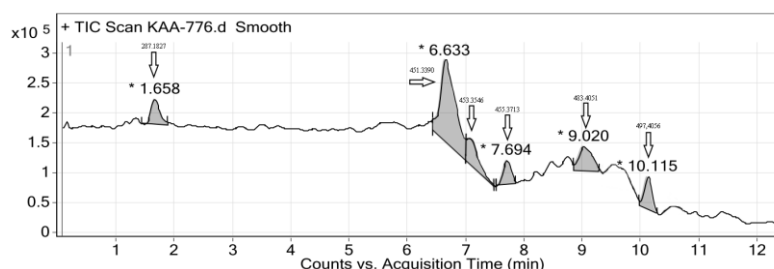


Рис. 4. Хроматограмма полного ионного тока реакционной смеси 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов жирных кислот подсолнечного масла 2a
Fig. 4. Chromatogram of the total ion current of the reaction mixture of 2-alkyl-5-phenyl-4,5,6,7-tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidine-7-ols of sunflower oil fatty acids 2a

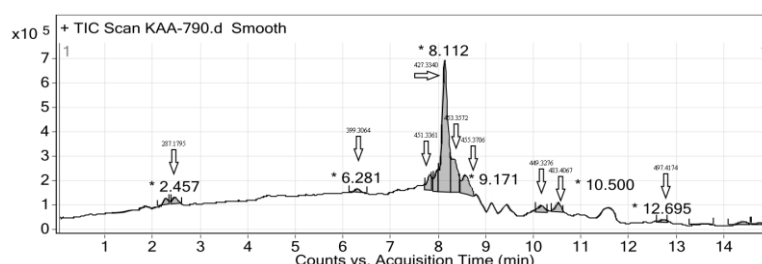


Рис. 5. Хроматограмма полного ионного тока реакционной смеси 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов жирных кислот пальмового масла 2b
Fig. 5. Chromatogram of the total ion current of the reaction mixture of 2-alkyl-5-phenyl-4,5,6,7-tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidine-7-ols of palm oil fatty acids 2b

тате данного процесса образуются производные 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов (2a-с).

Основным ожидаемым целевым продуктом данного взаимодействия являются

2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олы (2a-с), однако, не исключено образование побочных продуктов, таких как не полная циклизация триазол-5-ил)амино)-3-фе-

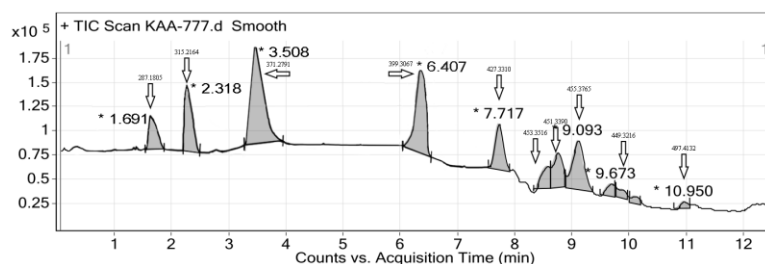
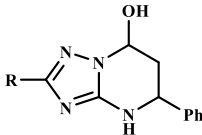


Рис.6. Хроматограмма полного ионного тока реакционной смеси 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов жирных кислот кокосового масла **2c**
Fig. 6. Chromatogram of the total ion current of the reaction mixture of 2-alkyl-5-phenyl-4,5,6,7-tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidine-7-ols of palm oil fatty acids **2c**

Таблица 2. Сводные результаты ВЭЖХ/МС анализа смесей 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов жирных кислот подсолнечного (2a), пальмового (2b) и кокосового (2c) масел

Table 2. Summary of HPLC results/MS analysis of mixtures of 2-alkyl-5-phenyl-4,5,6,7-tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidine-7-ols of fatty acids of sunflower (2a), palm (2b) and coconut (2c) oils

	2a		2b		2c	
	RT, мин	м.д., %	RT, мин	м.д., %	RT, мин	м.д., %
R = C ₅ H ₁₁	1.658	2.77	2.457 2.280	0.42 0.22	1.691	3.22
R = C ₇ H ₁₅	—	—	—	—	2.318	6.81
R = C ₁₁ H ₂₃	—	—	—	—	3.508	43.51
R = C ₁₃ H ₂₇	—	—	6.281	0.31	6.407	17.22
R = C ₁₅ H ₃₁	—	—	8.112	52.67	7.717	8.02
R = C ₁₇ H ₃₃	7.115	21.21	8.468	19.24	8.499	3.41
R = C ₁₇ H ₂₉	—	—	10.116	1.12	8.721	4.20
R = C ₁₇ H ₃₅	7.694	4.72	9.171	7.25	9.093	7.32
R = C ₁₇ H ₃₁	6.633	59.41	7.700 7.756	4.61 2.15	9.673	2.03
R = C ₁₉ H ₃₅	9.673	4.19	10.500	2.40	—	—
R = C ₂₀ H ₄₁	10.115	4.05	12.695	1.29	10.950	1.11
Примеси		3.65		8.32		3.15

нилпропан-1-олов **2a-c*** или димеры альдегидов (при автоконденсации коричневого альдегида). Тем не менее, выбранные условия реакции минимизируют побочные процессы и способствуют преимущественному образованию конденсированных систем триазолопиримидина. Это подтверждается полученными данными ВЭЖХ/МС анализа смесей **2a-c**. Спектры обнаруженных пиков включали сигналы устойчивых молекулярными ионами [M⁺] тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов. Другим свидетельством образования целевых соединений явля-

ется наличие в масс-спектрах (полученных в режиме полного ионного тока) характерных фрагментных ионов при m/z ~149 и ~151, возникающих в результате распада триазолопиримидинового ядра и соответствующих отщеплению фрагмента 3-амино-3-фенилпропан-1-ола.

Результаты ВЭЖХ/МС (табл. 1-2) показали, что состав продуктов конденсации аминотриазолов с коричневым альдегидом определяется жирнокислотным профилем исходного масла. Для подсолнечного масла (**2a**) характерно преобладание производных линолевой кислоты (59,41%), для пальмового (**2b**) – пальмитиновой

(52,67%), а для кокосового (2с) – лауриновой (43,51%), что отражает их природный состав. Пропорции и соотношения производных прочих карбоновых кислот также соответствуют среднему составу исходных триацилглицеринов. Отклонение содержания триазолопиримидинов от исходных алкиламинотриазолов не существенно.

Однако, при этом в смесях 2а-с обнаружены примеси (3-8%), вероятно соединений с неполной циклизацией, продуктов автоконденсации альдегидов, а также побочных продуктов синтеза длинноцепочечных аминотриазолов, помимо этого на хроматограммах также присутствуют неразмеченные пики, соответствующие компонентам использованного при приготовлении смесей 2а-с ПАВ. При этом основное направление реакции соответствует ожидаемому образованию триазолопиримидинов.

В целом, проведенное исследование подтвердило возможность целенаправленного получения конденсированных гетероциклов – производных 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов – из доступного и возобновляемого сырья. Установленные закономерности формирования продуктовых смесей открывают перспективы для варьирования состава ингибиторов коррозии за счёт выбора конкретного типа растительного масла. Это позволяет оптимизировать свойства получаемых композиций – от растворимости до ингибирующей активности – и делает исследованный подход привлекательным с точки зрения как фундаментальной химии, так и практического применения в нефтехимии и смежных областях.

Список литературы/References

1. Fredd C.N., Fogler H.S., *SPE Journal*, 1998; 3: 34-41. <https://doi.org/10.2118/31074-PA>
2. Iqbal M.I., Kudapa V.K., *CRC Press*, 2025: 484.

Заключение

В работе показана возможность получения новых производных 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов из подсолнечного, пальмового и кокосового масел. Методика синтеза, включающая стадии образования аминотриазолов и их конденсации с коричневым альдегидом, продемонстрировала высокую воспроизводимость и селективность. Проведённый ВЭЖХ/МС-анализ подтвердил, что состав получаемых смесей напрямую коррелирует с жирнокислотным профилем исходного сырья, что позволяет прогнозировать структуру целевых продуктов подобного превращения при использовании прочих триацилглицеринов в будущем.

Наличие побочных продуктов не препятствует выделению основных компонентов, а варьирование природы исходного масла открывает возможности для направленного синтеза ингибиторов коррозии с заданными характеристиками. Ранее проведенные коррозионные испытания показали высокую эффективность данных соединений в качестве ингибиторов кислотной коррозии стали. Таким образом, полученные данные подтверждают не только фундаментальную значимость разработанного подхода, но и его практическую ценность для создания новых антикоррозионных композиций на основе возобновляемого растительного сырья.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

3. Avdeev Ja. G., Kuznecov Ju. I., *Uspehi himii*, 2012; 81(12): 1133-1145. <https://doi.org/10.1070/RC2012v081n12ABEH004292> (In Russ.)

4. Swathi P.N., Rasheeda K., Samshuddin S., Alva V.D., *Journal of Asian Scientific Research*, 2017; 7: 301-308.
5. Kruzhilin A. A., Shevtsov D. S., Potapov A. Yu., Shikhaliev Kh. S., Kozaderov O. A., Prabhakar Ch., Kasatkin V. E., *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2022; 11: 774-795. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-2-22>
6. Kruzhilin A.A., Lyapun D.V., Shevtsov D.S., Kozaderov O.A., Potapov A.Yu., Zartsyn I.D., Prabhakar Ch., Shikhaliev Kh.S., *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2021; 10: 1474-1492. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-4->

Информация об авторах / Information about the authors

А.А. Кружилин – к.х.н., заведующий лабораторией органических добавок для процессов химического и электрохимического осаждения металлов и сплавов, применяемых в электронной промышленности, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2262-0131>

И.А. Дмитриев – студент кафедры органической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация

М.А. Потапов – к.х.н., ведущий инженер-химик кафедры биохимии и физиологии клетки медико-биологического факультета, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация

Х.С. Шихалиев – д.х.н., проф., заведующий кафедрой органической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация

A.A. Kruzhilin – Ph.D., head of laboratory of organic additives for the processes of chemical and electrochemical deposition of metals and alloys used in the electronics industry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2262-0131>, e-mail: kruzhilin.alexey@gmail.com

I.A. Dmitriev – student of the Department of Organic Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

M.A. Potapov – Ph.D., Leading chemical engineer of the Department of Biochemistry and Cell Physiology of the Faculty of Medical Biology, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1795-7605>, e-mail: amidines@mail.ru

Kh.S. Shikhaliev – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Organic Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6576-0305>, e-mail: chocd261@chem.vsu.ru

Статья поступила в редакцию 15.09.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 26.11.2025.

The article was submitted 15.09.2025; approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 26.11.2025.