

## Изменение антропогенной нагрузки на экосистемы регионов России в начале XXI в. с использованием данных дистанционного зондирования

М. П. Васильев, А. А. Тронин

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия*  
*E-mail: mih.vasilev@mail.ru*

В работе рассматриваются изменения значений комплексного индекса антропогенной нагрузки на экосистемы в субъектах Российской Федерации в период 2009–2018 гг. На основе использования корреляционного анализа был определён набор показателей, включённых в данный индекс: потребление электроэнергии, количество отходов производства и потребления, содержание диоксида азота в атмосфере, доля антропогенных территорий в общей площади субъекта. Значения этих показателей были получены по результатам дистанционного зондирования Земли, а также из баз данных государственной статистики. В результате были определены регионы РФ с наибольшим уровнем антропогенной нагрузки на экосистемы и оценены тенденции изменения антропогенной нагрузки в различных субъектах. Наиболее высокие значения данного показателя в 2009 г. были зафиксированы в Москве, Санкт-Петербурге и Белгородской обл. К 2018 г. в группу регионов с очень высокими значениями индекса антропогенной нагрузки вошли также Курская, Липецкая, Тульская, Воронежская, Орловская, Ростовская, Оренбургская, Челябинская области. Значительная антропогенная нагрузка на экосистемы характерна также для ряда областей Западной Сибири (Новосибирская и Кемеровская области, Алтайский край, Республика Хакасия). Применение данных дистанционного зондирования как для идентификации локального антропогенного загрязнения воздушных масс диоксидом азота, так и для определения доли антропогенных территорий позволило получать более объективные оценки антропогенной нагрузки на экосистемы в субъектах РФ.

**Ключевые слова:** антропогенная нагрузка на экосистемы, субъекты РФ, корреляционный анализ, диоксид азота, антропогенные территории, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 12.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-95-102

### Введение

К настоящему времени накоплен большой мировой опыт оценки экологической безопасности территорий и разработан ряд интегральных экологических индикаторов. Однако существуют значительные расхождения в оценках уровня экологической безопасности в регионах Российской Федерации, подготовленных по различным методикам, что препятствует принятию оптимальных решений по управлению экологическими рисками (Тронин, 2019). В то же время в условиях возрастающей антропогенной нагрузки необходимо иметь объективное представление об уровне экологической безопасности территорий. Кроме того, в связи с быстро меняющейся ситуацией требуется оперативное обновление карт уровня экологической безопасности регионов. Всё это определяет актуальность дальнейшей разработки интегральных критериев для оценки экологической безопасности территорий. В представленной работе рассматривается подход к решению данной задачи на основе разработки комплексного критерия антропогенной нагрузки на экосистемы субъектов РФ и его реализация для территории России.

## Объекты и методы

Для оценки уровня антропогенной нагрузки на экосистемы субъектов РФ были проанализированы различные источники данных. Учитывая огромные размеры территории, целесообразно использовать три основных источника: Росстат, Росреестр и дистанционное зондирование. Проанализируем данные Росстата и Росреестра, которые могут быть использованы для оценки антропогенной нагрузки и здоровья экосистем. Из широкого круга экологических показателей можно выбрать наиболее релевантные, измеряемые с высокой точностью и имеющие длительные ряды наблюдений (*таблица*): *забор воды* — забор воды из природных водных объектов (тыс. м<sup>3</sup>); *выбросы* — выбросы загрязняющих атмосферу веществ стационарными и передвижными источниками (т); *отходы* — образование отходов производства и потребления (т); *лесистость* — лесистость территории, общая площадь земель лесного фонда и земель иных категорий, на которых расположены леса (%); *особо охраняемые природные территории* (ООПТ) — удельный вес площади ООПТ в общей площади территории (%); *ВРП* — валовой региональный продукт (валовая добавленная стоимость в основных ценах в текущих ценах, млн руб.); *потребление электроэнергии* — потребление электроэнергии (тыс. кВт·ч); *природные территории* — доля площади административной единицы, занятая природными экосистемами: лесами, болотами и прочими землями, определяемая по данным Росреестра (%).

Для сравнения будем использовать удельные величины, т. е. отнесённые к площади региона. Так, величины «забор воды», «выбросы», «отходы», «ВРП» и «потребление электричества» отнесены к 1 км<sup>2</sup> территории региона, а «лесистость», «ООПТ» и «природные территории» выражены в процентах от территории. Результаты за 2015 г. представлены в *таблице*.

Коэффициенты корреляции экологических критериев Росстата и Росреестра на 2015 г.

|                            | Забор воды | Выбросы в атмосферу | Отходы | Лесистость | ООПТ  | ВРП         | Потребление электроэнергии | Природные территории |
|----------------------------|------------|---------------------|--------|------------|-------|-------------|----------------------------|----------------------|
| Забор воды                 | 1,00       | <b>0,86</b>         | 0,19   | -0,16      | 0,04  | <b>0,65</b> | <b>0,84</b>                | 0,06                 |
| Выбросы в атмосферу        |            | 1,00                | 0,20   | -0,14      | -0,08 | <b>0,92</b> | <b>1,00</b>                | 0,05                 |
| Отходы                     |            |                     | 1,00   | 0,07       | 0,07  | 0,13        | 0,18                       | 0,04                 |
| Лесистость                 |            |                     |        | 1,00       | 0,13  | -0,12       | -0,13                      | 0,69                 |
| ООПТ                       |            |                     |        |            | 1,00  | -0,06       | -0,08                      | 0,22                 |
| ВРП                        |            |                     |        |            |       | 1,00        | <b>0,95</b>                | 0,02                 |
| Потребление электроэнергии |            |                     |        |            |       |             | 1,00                       | 0,06                 |
| Природные территории       |            |                     |        |            |       |             |                            | 1,00                 |

Примечание: Значимые коэффициенты корреляции выделены жирным шрифтом.

Корреляционный анализ показал, что одна из наиболее значимых характеристик, отражающих интенсивность развития экономической деятельности, — потребление электроэнергии. Этот показатель тесно коррелирован с ВРП, объёмом забора воды из природных водных объектов, а также выбросами загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных и передвижных источников. Следовательно, он может заменить их в расчётах. В качестве следующего показателя был принят объём отходов производства и потребления, так как его значение слабо коррелировано с другими показателями, и, таким образом, он вносит дополнительную информацию в оценку антропогенной нагрузки.

Анализ третьего источника информации об антропогенной нагрузке и состоянии экосистем — данных дистанционного зондирования — показывает перспективность использования двух величин: диоксида азота и доли природных территорий.

Выбор содержания диоксида азота в атмосфере был связан с тем, что сравнительно короткое время его жизни обуславливает локализованность этого газа в тропосфере и малую вероятность его переноса на большие расстояния. Таким образом, диоксид азота может служить идентификатором воздушных масс в пределах конкретного субъекта РФ (Тронин и др., 2019). Соотношение природных и антропогенных территорий отражает пространственное распределение антропогенной нагрузки по территории субъектов РФ. Этот показатель слабо коррелирован с другими рассматриваемыми показателями. Поэтому он также был включён в комплексный индекс антропогенной нагрузки на экосистемы. Отметим здесь, что анализ других малых газовых компонентов показал их непригодность для оценки антропогенной нагрузки для всей территории России. Так, оказалось, что в Дальневосточном регионе фиксируется высокая природная концентрация диоксида серы, вызванная извержением вулканов.

В соответствии с методикой Росреестра в антропогенные земли были включены сельскохозяйственные земли, земли застройки, земли под дорогами, нарушенные земли. Однако доля антропогенных территорий может быть также получена на основе использования результатов дистанционного зондирования (Тронин, 2013). Для оценки возможных различий данных Росреестра и дистанционных методов в настоящей работе для определения площади природных и антропогенных территорий была использована карта растительности России масштаба 1:5 000 000, составленная по данным дистанционного зондирования (Барталев, Лупян, 2013).

Затруднения в отнесении территорий к природным или антропогенным вызвали два класса: «луга» и «открытые грунты и выходы горных пород». Анализ карты показал, что к классу «луга» относятся как естественные луга, так и сельскохозяйственные угодья. Причина этого заключается в схожести спектральных характеристик и одинаковом временном ходе коэффициентов спектральной яркости в вегетационный период. Для разделения природных и антропогенных территорий для указанных классов был выполнен визуальный анализ карт растительности России и данных дистанционного зондирования высокого разрешения. В дальнейшей работе были использованы два варианта значений доли антропогенных территорий в субъектах РФ: по данным Росреестра и по результатам дистанционного зондирования.

Таким образом, для оценки уровня антропогенной нагрузки на экосистемы субъектов РФ использовались следующие показатели: потребление электроэнергии (тыс. кВт·ч·км<sup>-2</sup>), образование отходов производства и потребления (т·км<sup>-2</sup>), содержание диоксида азота в атмосфере ( $n \times 10^{13}$  молекул·см<sup>-2</sup>), доля антропогенных территорий в общей площади субъекта РФ. Их значения для каждого субъекта РФ были получены по данным Росстата, Росреестра и результатам дистанционного зондирования для четырёх временных срезов: 2009, 2012, 2015 и 2018 гг.

Для объединения выбранных четырёх показателей, имеющих разные единицы измерения, в комплексный индекс антропогенной нагрузки было выполнено нормирование значений этих показателей и перевод их в относительные единицы в диапазоне от 0 до 1 с помощью линейной нормировки по «минимуму». Результаты нормировки значений четырёх выбранных показателей для каждого субъекта РФ затем суммировались с равными весами. Показатель, полученный по приведённой методике, является комплексным индексом антропогенной нагрузки. Его значения также выражены в относительных единицах от 0 до 1. Все субъекты РФ были разбиты по величине этого индекса на пять групп: 0,0–0,2; 0,21–0,4; 0,41–0,6; 0,61–0,8; 0,81–1,0.

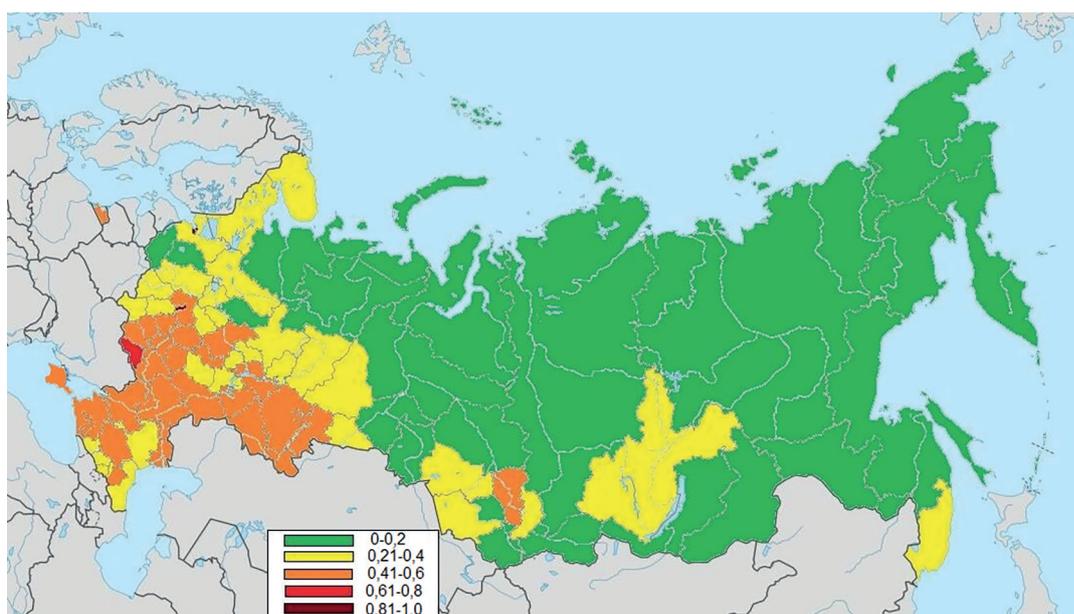
## Обсуждение результатов

Пространственное распределение по территории РФ значений индекса антропогенной нагрузки на экосистемы в 2009, 2012, 2015 и 2018 гг. представлено на *рис. 1, 2* (см. с. 98, 99).

Значения данного индекса в 2009 г., полученные с учётом доли антропогенной нагрузки на основе данных Росреестра, отражены на *рис. 1а*, а на основе данных дистанционного зондирования — на *рис. 1б*.

На *рис. 2* представлено распределение индекса антропогенной нагрузки в 2012, 2015 и 2018 гг., при расчёте которого доля антропогенных территорий определена по данным Росреестра.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшие значения индекса антропогенной нагрузки в 2009 г. (см. *рис. 1а*) были характерны для Москвы, Санкт-Петербурга (0,81–1,0) и Белгородской обл. (0,61–0,8). Для Москвы и Санкт-Петербурга все четыре составляющие индекса очень высоки. Белгородская обл. — индустриально-аграрный регион, экономика которого опирается на добычу и переработку железной руды Курской магнитной аномалии, а также высокоразвитое сельское хозяйство. В связи с этим большая доля площади области (85 %) относится к антропогенным территориям. Значения остальных трёх показателей в Белгородской обл. также высоки.



*а*

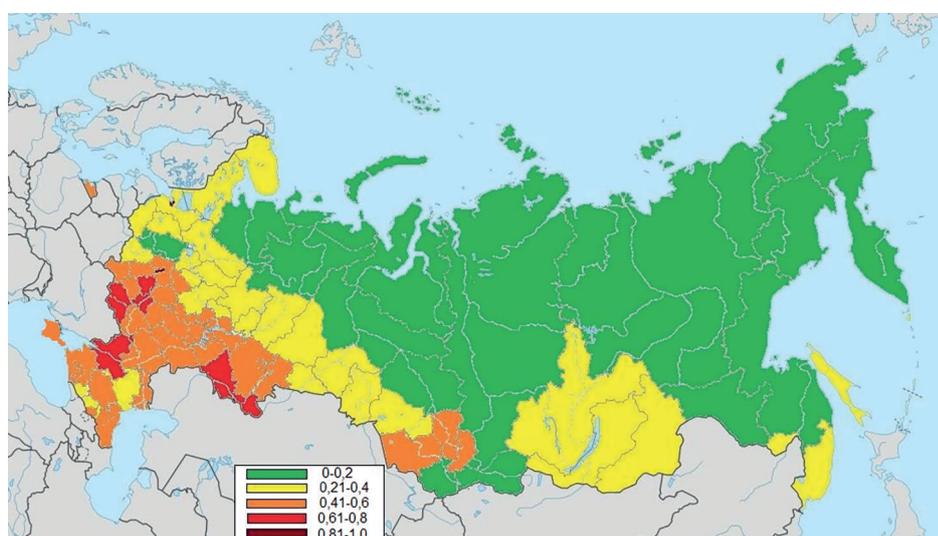


*б*

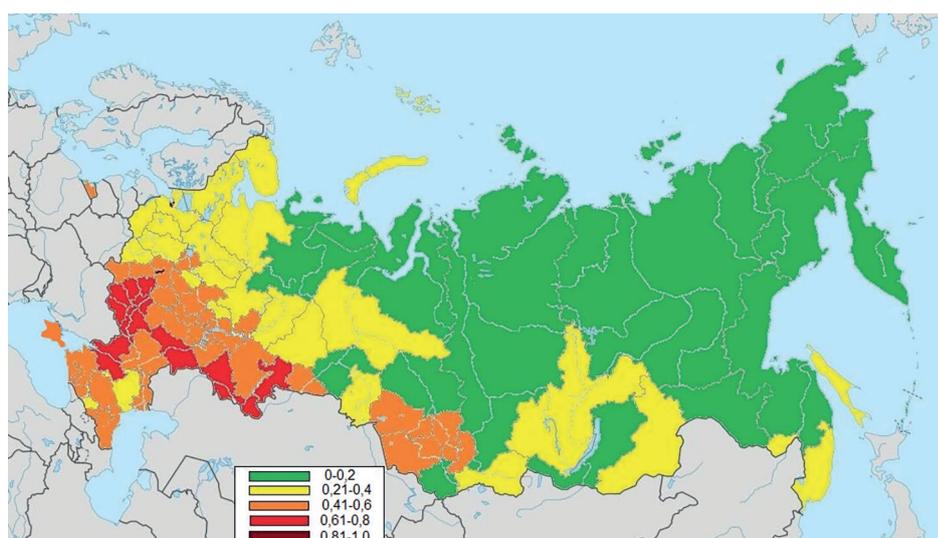
*Рис. 1.* Индекс антропогенной нагрузки на экосистемы на территории субъектов РФ в 2009 г. в относительных единицах. Доля антропогенных территорий определена по данным: *а* — Росреестра; *б* — дистанционного зондирования



*a*



*б*



*в*

Рис. 2. Индекс антропогенной нагрузки на экосистемы на территории субъектов РФ в относительных единицах: *a* — в 2012 г.; *б* — в 2015 г.; *в* — в 2018 г. Доля антропогенных территорий определена по данным Росреестра

К 2018 г. в группу регионов с очень высокими значениями индекса антропогенной нагрузки (0,61–0,8) вошли также Курская, Липецкая, Тульская, Воронежская, Орловская, Ростовская, Оренбургская, Челябинская области. Значительная антропогенная нагрузка на экосистемы характерна также для ряда областей Западной Сибири (Новосибирская и Кемеровская области, Алтайский край, Республика Хакасия). Для них характерно сочетание развитой промышленности и сельского хозяйства. Таким образом, наибольшие значения индекса антропогенной нагрузки приурочены к наиболее экономически развитым центральным и южным областям европейской территории России (ЕТР) и югу Западной Сибири. Возрастание величины индекса антропогенной нагрузки на ЕТР связано в основном с увеличением объёмов отходов и ростом энергопотребления. При этом здесь не отмечалось значительного роста концентрации диоксида азота. На юге Западной Сибири повышение индекса антропогенной нагрузки связано как с образованием больших объёмов отходов горнодобывающей промышленности и высокой концентрацией диоксида азота, так и с увеличением доли антропогенных территорий. Необходимо также отметить, что практически во всех регионах к 2018 г. увеличился вклад автомобильного транспорта в эмиссию диоксида азота в атмосферу.

При сравнении значений индекса антропогенной нагрузки в 2009 г., полученных на основе данных Росреестра (см. *рис. 1а*) и дистанционного зондирования (см. *рис. 1б*), выяснилось, что наибольшие различия отмечаются в Республике Калмыкия и Астраханской обл. Очевидно, это связано с тем, что доли антропогенных территорий, полученные разными методами, достигают здесь 75–80 %. В соответствии с методикой Росреестра большие площади в этих регионах отнесены к категории «сельскохозяйственные земли» (пастбища), т. е. к антропогенным территориям. Однако по данным дистанционного зондирования эти территории попадают в классы «степь», т. е. являются природными территориями. В настоящее время для уточнения долей природных и антропогенных земель в субъектах РФ проводятся дополнительные исследования с использованием результатов дистанционного зондирования Земли по программе Европейской комиссии Copernicus (European Union's Earth Observation Programme Copernicus, <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>).

## Выводы

В результате проведённых исследований было определено, что наибольшие значения индекса антропогенной нагрузки приурочены к наиболее экономически развитым центральным и южным областям ЕТР. Возрастание величины индекса антропогенной нагрузки в 2018 г. по сравнению с 2009 г. связано в основном с увеличением объёмов отходов и ростом энергопотребления. При этом в указанных областях не отмечалось значительного роста концентрации диоксида азота. На юге Западной Сибири также находится ряд регионов (Новосибирская и Кемеровская области, Алтайский край, Республика Хакасия) с высокими значениями этого индекса, что связано как с образованием больших объёмов отходов горнодобывающей промышленности и высокой концентрацией диоксида азота, так и со значительной долей антропогенных территорий. Практически во всех регионах к 2018 г. увеличился вклад автомобильного транспорта в эмиссию диоксида азота в атмосферу. Сравнение значений индекса антропогенной нагрузки, рассчитанных с учётом данных Росреестра и дистанционного зондирования, показало, что различие между ними может достигать 75–80 % (Республика Калмыкия и Астраханская обл.). Для уточнения долей природных и антропогенных земель в этих субъектах РФ проводятся дальнейшие исследования.

Представленный индекс может быть использован при разработке предложений по улучшению экологической ситуации в конкретном субъекте с учётом выявления наиболее негативных факторов, определяющих место этого региона в рейтинге. Применение данных дистанционного зондирования как для идентификации локального антропогенного загрязнения воздушных масс, так и для определения доли антропогенных территорий позволит получать более объективные оценки антропогенной нагрузки на экосистемы в конкретных субъектах РФ.

## Литература

1. *Барталев С. А., Лупян Е. А.* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
2. *Тронин А. А.* Дистанционные методы при решении задач экологической безопасности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 1. С. 238–245.
3. *Тронин А. А.* Ранжирование регионов России по уровню экологической безопасности // *Региональная экология*. № 1(55). 2019. С. 5–12.
4. *Тронин А. А., Крицук С. Г., Киселёв А. В.* Многолетние тренды содержания диоксида азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 2. С. 259–265.

## Changes in the anthropogenic load on ecosystems in the territorial subjects of the Russian Federation in the early 21<sup>st</sup> century

M. P. Vasiliev, A. A. Tronin

*Saint Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS  
Saint Petersburg 197110, Russia  
Email: mih.vasilev@mail.ru*

The study considers changes in the values of the complex index of anthropogenic pressure on ecosystems in the subjects of the Russian Federation in the period of 2009–2018. The set of indicators included in this index was determined using correlation analysis. There were the following indicators: electricity consumption, the amount of production and consumption waste, nitrogen dioxide content in the atmosphere, the share of anthropogenic territories in the total subject area. The values of these indicators were obtained from the results of remote sensing of the Earth and state statistics databases. As a result, the regions with the highest level of anthropogenic load on ecosystems were identified and the trends in this index in various subjects were estimated. The highest values of anthropogenic load in 2009 were recorded in Moscow, St. Petersburg and the Belgorod region. By 2018 the Kursk, Lipetsk, Tula, Voronezh, Oryol, Rostov, Orenburg, Chelyabinsk Regions were also included in the group of regions with very high values of this index. Significant anthropogenic load on ecosystems is also observed in a number of Western Siberia regions (Novosibirsk and Kemerovo Regions, Altai Kray, Republic of Khakassia). The use of remote sensing data both for identifying local anthropogenic pollution of the atmosphere by nitrogen dioxide and determining the proportion of anthropogenic territories has made it possible to obtain more objective estimates of the anthropogenic load on ecosystems in the territorial subjects of Russia.

**Keywords:** anthropogenic load on ecosystems, territorial subjects of the Russian Federation, correlation analysis, nitrogen dioxide, anthropogenic territories, remote sensing

Accepted: 12.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-95-102

## References

1. Bartalev S. A., Loupian E. A., Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova (Research and inventions of Space Research Institute RAS on the development of methods for satellite monitoring of vegetation cover), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 197–214.
2. Tronin A. A., Distantsionnye metody pri reshenii zadach ekologicheskoi bezopasnosti (Remote sensing methods for solving problems of environmental safety), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 238–245.

3. Tronin A. A., Ranzhirovanie regionov Rossii po urovnyu ekologicheskoi bezopasnosti (Ranking of Russian regions by the level of environmental safety), *Regional'naya ekologiya*, 2019, No. 1(55), pp. 5–12.
4. Tronin A.A, Kritsuk S. G., Kisilev A. V., Mnogoletnie trendy sodержaniya dioksida azota v vozdushnom basseine Rossii po sputnikovym dannym (Long-term trends in nitrogen dioxide content in the air basin of Russia according to satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 259–265.