

*Д. С. Логинов¹**

Геоинформационное картографирование геологических рисков: практические решения на примере слабо изученных районов

¹ ООО Целевой Горизонт, г. Москва, Российская Федерация
* e-mail: loginov@cartlab.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам использования методов геоинформационного картографирования для оценки геологических рисков как важного показателя при планировании геологоразведочных работ. Основные возможности геоанализа рассматриваются на примере сухопутных и морских районов со слабой геолого-геофизической изученностью (северная часть Омской области и юго-восточная часть Бенгальского залива). Подробно описан выбор факторов и характеризующих их геоданных, рассмотрены методические вопросы построения итоговых карт районирования и представлены основные результаты их использования. Рассмотренные практические решения иллюстрируют возможности картографической визуализации значений факторов вне зависимости от выбранной методики оценки геологических рисков и от минимальной единицы картографирования, в качестве которой могут использоваться как лицензионные участки недр, так и расчетные зоны влияния перспективных объектов осадконакопления. Полученные результаты могут быть использованы при геоинформационном картографировании геологических рисков других территорий с разной степенью геолого-геофизической изученности.

Ключевые слова: геоанализ, геологические риски, геологоразведка, изученность, карты районирования, полигоны Тиссена

*D. S. Loginov¹**

Geo-information mapping of geological risks: practical solutions for poorly studied areas

¹ Tselevoi Gorizont LLC, Moscow, Russian Federation
* e-mail: loginov@geohorizon.ru

Abstract. The article focuses on the use of geo-information mapping methods to estimate geological risks as an important indicator in planning of exploration works. The main opportunities of the geo-analysis are reviewed on the example of onshore and offshore regions with poorly geological and geophysical study (northern part of the Omsk region (Russian Federation) and south-eastern part of the Bay of Bengal). The selection of factors and geodata characterizing them is described in details. The methodological issues of the final zoning maps creation are also discussed, and the main results of the maps application are presented. The practical decisions discussed show the possibilities of the cartographic visualization of the factors values. The visualization does not depend on the chosen methodology of geological risks estimation and on the minimal mapping unit which can be both licensed subsoil areas and calculated influence zones of promising objects of sedimentation. The results obtained can be used in geo-information mapping of geological risks in other territories with different degree of geological and geophysical study.

Keywords: geo-analysis, geological risks, exploration, geological and geophysical study, zoning maps, Thiessen polygons

Введение

Оценка геологических рисков используется в геологоразведке (ГРР) для характеристики вероятности успеха того или иного события (например, присутствие углеводородов) в пределах конкретной области. Риск-анализ выполняется по совокупности факторов, пространственная составляющая которых способствует применению методов геоинформационного картографирования. Результатом являются карты районирования распределения геологических рисков на исследуемой области. В условиях слабой геолого-геофизической изученности такие карты являются важным инструментом для принятия решений по планированию сценария последующего геологического изучения недр.

В настоящей статье рассматриваются методические вопросы и практические решения построения карт районирования геологических рисков на примере сухопутных и морских районов со слабой степенью геолого-геофизической изученности. Полученные результаты могут быть использованы при геоинформационном картографировании геологических рисков других территорий с разной степенью геолого-геофизической изученности.

О геологических рисках

Отраслевые специалисты признают многофакторность понятия «геологический риск» [1]. В текущем исследовании под геологическим риском понимается вероятность получения результата, удовлетворяющего поставленным задачами. В качестве задач могут выступать: оценка рентабельности приобретения лицензионных участков нераспределенного фонда (включая вероятность получения отрицательного результата при поисках месторождений); планирование мест для проведения этапов ГРР; оценка целесообразности разработки месторождения, и другие задачи.

В зависимости от состояния геолого-геофизической изученности используются различные методики оценки геологических рисков. Например, в работе [2] представлена оценка вероятности геологического успеха ГРР на поисково-оценочном этапе для структурной ловушки, выявленной по итогам детальных морских сейсморазведочных работ МОГТ 2D. В работе [3] рассмотрены диапазоны вероятности успешности геологоразведочных проектов для геологических объектов различной степени изученности на основе оценки мультипликативного влияния факторов. Методы получения вероятностной оценки ресурсов нефти и газа участков недр на основе суммирования вероятностных оценок ресурсов локальных объектов с учетом зависимости их геологических рисков анализируются в работе [4].

В основе большинства известных примеров оценки геологических рисков лежит исследование совокупности факторов (в литературе встречается понятие «геологический плей» (geological play) [4]), которые прямо или косвенно характеризуют вероятность успеха (например, присутствие углеводородов). Экспертная оценка каждого фактора призвана сравнить параметры исследуемого объекта с параметрами уже известных месторождений-аналогов, находящихся в схожих

геологических условиях. При этом ранжирование выполняется качественным способом (с условным делением значений на высокие, средние, низкие перспективы) или количественным способом (с присвоением коэффициентов в долях единицы и вычислением итогового ранга как произведение коэффициентов).

О картографировании геологических рисков

Пространственная составляющая факторов, применяемых для оценки геологических рисков, позволяет использовать методы геоинформационного картографирования как для выполнения риск-анализа в ГИС, так и для визуализации результатов посредством карт районирования. Известны примеры использования ГИС для оценки инженерно-геологических рисков на территории горных отводов и принятия обоснованных управленческих решений [5], для картографирования геоэкологических рисков эксплуатации нефтяных месторождений [6]. Методы геоинформационного картографирования также применяются при оценке антропогенных рисков возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного и экологического характера [7], для принятия решений по включению карт в комплексные атласы [8], и др.

Карты районирования исследуемой территории по геологическим рискам применяются для наглядного представления результатов риск-анализа. В зависимости от характера элементов риска используются способы значков, качественного фона и изолиний [9]. Применительно к геологоразведке, которая выполняется в пределах участка работ разного ранга (от лицензионных участков до нефтегазовых районов), наиболее эффективным является способ качественного фона. Минимальные единицы картографирования оформляются по качественным показателям либо по результатам квалификации количественных показателей, а для наглядного отображения участков с наиболее благоприятными прогнозами используется цветовая шкала вида «светофор».

Автор принимал участие в серии работ по оценке перспектив нефтегазоносности некоторых районов Российской Федерации и Республики Индия с разным уровнем геолого-геофизической изученности. Картографическое обеспечение риск-анализа в ГИС ArcGIS заключалось в подборе пространственных данных и построении на их основе вероятностных карт факторов и итоговой карты районирования по интегральному показателю. Далее рассмотрим некоторые методические приемы и практические решения по геоинформационному картографированию геологических рисков.

Картографирование качественной оценки перспектив нефтегазоносности лицензионных участков недр (на примере северной части Омской области, РФ)

Определение нефтегазового потенциала и оценка рисков проведения ГРП выполнялась в 2015 году в пределах 13 лицензионных участков недр, расположенных в северной части Омской области, и одного участка на юге Тюменской области. Участки находятся в южной части Каймысовской нефтегазовой области, в пределах структур I порядка: Старосолдатский, Полорудовский, Демьян-

ский мегавалы, Васинский мегапрогиб и северная часть Муромцевской мегавадины. Территория характеризуется низкой геолого-геофизической изученностью (43 поисковые скважины и около 7 тыс. пог. км. сейсморазведки МОГТ 2D). Риск-анализ выполнялся с учетом следующих факторов:

- 1) Условия распространения нефтематеринских пород (F_1);
- 2) Наличие коллектора (регионального продуктивного комплекса) (F_2);
- 3) Наличие и качество покрышки (вероятность сохранности залежи) (F_3).

Состав факторов обусловлен необходимостью оценки условий формирования залежей углеводородов, их сохранности и возможного замещения нефти водой в потенциально нефтеносных породах-коллекторах. Для выполнения последующей оценки рисков по результатам изучения геологического строения, региональных геологических закономерностей (тектонических, стратиграфических, литолого-фациальных и др.) и других параметров было определено, что нефтематеринскими породами на исследуемой территории являются глинистые отложения васюганской и тюменской свиты. Для качественной оценки факторов, характеризующих перспективность изучения этих отложений, были определены объекты исследования и соответствующие им пространственные данные (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика факторов и соответствующих им объектов исследования и исходных данных для риск-анализа

Факторы	Объекты исследования	Пространственные данные
Условия распространения нефтематеринских пород (F_1)	Термические условия генерации нефти	Карта теплового потока
Наличие коллектора (регионального продуктивного комплекса) (F_2)	Песчаники васюганской / тюменской свиты	Карта лито-фациальных зон отложений васюганской / тюменской свиты
Наличие и качество покрышки (вероятность сохранности залежи) (F_3)	Глинистые толщи георгиевской и баженовской свит / нижней подсвиты васюганской свиты	Схемы развития вероятной покрышки

Принятая в работе оценка геологических рисков основана на выделении благоприятных, средних и менее благоприятных условий формирования залежей и ловушек углеводородов по каждому фактору. В результате на карте фактора F_2 благоприятные и средние показатели были отнесены к зонам распространения палеопрогибов (предположительно русла палеорек). Три категории перспектив на картах факторов F_1 и F_3 рассчитывались путем квалификации количественных значений теплового потока и мощности отложений соответственно.

Итоговая карта районирования представляет собой результат логического сложения карт факторов, характеризующих различную степень распространения

покрышек, коллекторов и нефтематеринских пород (с учетом зрелости органического вещества). В текущей работе в силу низкой изученности итоговый ранг перспективности новых объектов, полученных в результате оверлейного сложения слоев данных (инструмент «Union»), соответствует минимальному из рангов, представленных на картах факторов (рис. 1). Такая методика позволила избежать неоправданного завышения оценки перспективности и отобразить общий уровень геолого-геофизической изученности территории исследования.

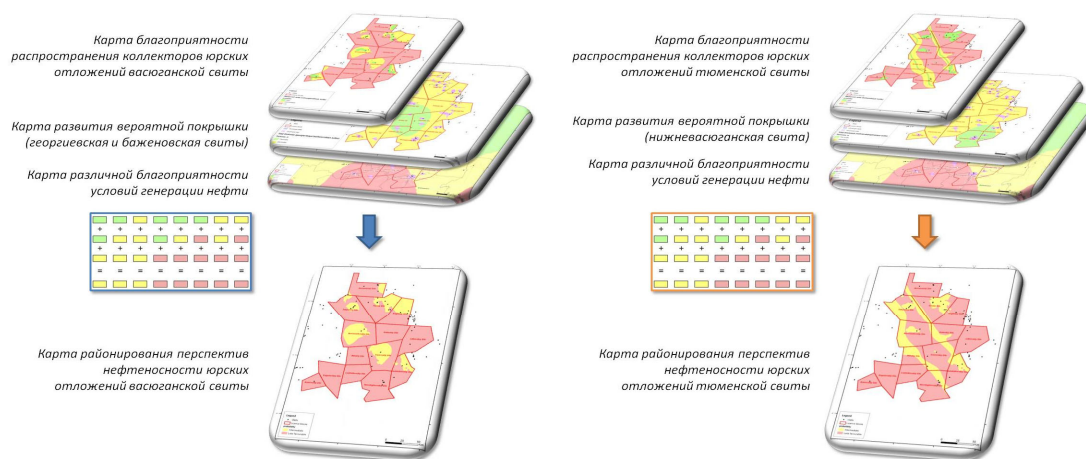


Рис. 1 Схема построения итоговой карты районирования перспектив нефтеносности по качественным значениям геологических рисков

Итоговые карты районирования по двум перспективным нефтематеринским породам показали, что оцениваемые лицензионные участки недр обладают невысокими перспективами нефтеносности, однако имеются зоны средних значений на 7 участках для юрских отложений васюганской свиты и на 8 участках для отложений тюменской свиты.

Низкие значения перспективности обусловлены минимальным количеством факторов, участвующих в оценке геологических рисков. Тем не менее, перспективность рассматриваемых лицензионных участков недр дополнительно снижается в связи с возможным наличием разрывных локальных нарушений по данным сейсморазведки на одном из лицензионных участков в северной части исследуемой территории. Эти нарушения в купольной части структур могут приводить к обводнению коллекторов (замещению нефти водой), поэтому для уточнения результатов анализа следует использовать доступные данные о структурных замыканиях (ловушках), в пределах которых могут быть сосредоточены скопления нефти.

Картографирование количественной оценки перспектив нефтегазоносности акватории (на примере юго-восточной части Бенгальского залива)

Изучение геологического строения юго-восточной части Бенгальского залива выполнено на основе данных морских сейсморазведочных работ МОГТ 2D, которые были проведены впервые в пределах эксклюзивной экономической

зоны Республики Индия около Андаманских островов в 2021-2022 гг. Анализ полученной сейсмогеологической модели и результатов использования дополнительных прямых и косвенных методов (включая анализ карт сейсмических атрибутов и результатов поиска нефтепроявлений по данным ДЗЗ) позволили определить перспективность зон распространения палеоканалов и эрозионных врезов (путей движения турбидитовых потоков) для осадочной формации Бенгальского конуса выноса (Bengal Fan). Геологические выводы исследования не противоречат результатам работы [10], в которой отмечено «обнаружение больших запасов углеводородов в глубоководной части Бенгальского залива, у Андамено-Никобарских островов» и выдвинуто предположение о «высокой перспективности дельтовых, авандельтовых и турбидитовых отложений, получивших распространение на континентальных окраинах Бенгальского залива».

Оценка геологических рисков выполнялась по отношению к перспективным объектам, предположительно вмещающим углеводороды, которые интерпретируются на временных сейсмических разрезах как локальные высокоамплитудные аномалии (далее – яркие пятна). В условиях отсутствия дополнительной геолого-геофизической информации о наличии коллектора, ловушки и покрышки, следующие факторы использовались для риск-анализа:

- 1) Доступность для бурения (F_1);
- 2) Мощность осадочных отложений (F_2);
- 3) Глубина залегания яркого пятна (F_3);
- 4) Размер яркого пятна (F_4);
- 5) Сейсмический образ яркого пятна (F_5).

Для оценки факторов, характеризующих перспективность проведения поисково-оценочного этапа ГРП в пределах ярких пятен, были определены объекты исследования и соответствующие им пространственные данные (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика факторов и соответствующих им объектов исследования и исходных данных для риск-анализа

Факторы	Объекты исследования	Пространственные данные
Доступность для бурения (F_1)	Глубина моря	Цифровая модель батиметрии GEBCO
Мощность осадочных отложений (F_2)	Мощность нефтеперспективных осадочных отложений	Карта мощности отложений
Глубина залегания яркого пятна (F_3)	Кровля яркого пятна	Структурная карта кровли сейсмического горизонта
Размер яркого пятна (F_4)	Протяженность яркого пятна	Контур яркого пятна
Сейсмический образ яркого пятна (F_5)	Локальные высокоамплитудные аномалии	Временные сейсмические разрезы

Большинство выбранных пространственных данных представлено в матричной форме, что позволяет перейти к количественному способу оценки геологических рисков. Так, значения показателей факторов F_1 , F_2 , F_3 были сняты посредством геоанализа в предварительно рассчитанных центроидах ярких пятен. Операция выполняется с помощью инструмента «Extract Values to Points», в результате работы которого полученные значения сохраняются в атрибутивной таблице точечных объектов. Количественной мерой фактора F_4 является линейный размер яркого пятна, который также рассчитывается в ГИС через «Calculate Geometry».

Ранжирование разнородных показателей осуществлялось нормированием количественных значений по числовой шкале от 0 до 1, где 1 – наиболее благоприятные условия. В такой шкале представлен и фактор F_5 , который характеризует экспертную оценку сейсмического образа яркого пятна. В результате для каждого объекта интегральный геологический риск был рассчитан перемножением значений без дополнительных весов, учитывая независимость каждого фактора в формировании итоговой оценки. Полученные значения стали основой для последующего построения вероятностных карт факторов.

Для картографической визуализации значений, рассчитанных для центроидов ярких пятен, было принято решение перейти к площадным объектам картографирования, т.е. к зонированию области исследования. Этот метод геоанализа хорошо известен в метеорологии и гидрологии [11, 12], в экономике [13], в экологии [14] и других сферах деятельности, где необходимо оценить области влияния факторов. В текущей работе зонирование выполнено с помощью полигонов Тиссена (диаграмм Вороного), которые ограничивают пространство областями, каждая точка которых расположена ближе к исходному центроиду, чем к остальным. Созданные инструментом «Create Thiessen Polygons» полигоны характеризуют зону влияния ярких пятен и являются минимальной единицей картографирования для карт факторов и итоговой карты районирования (рис. 2).

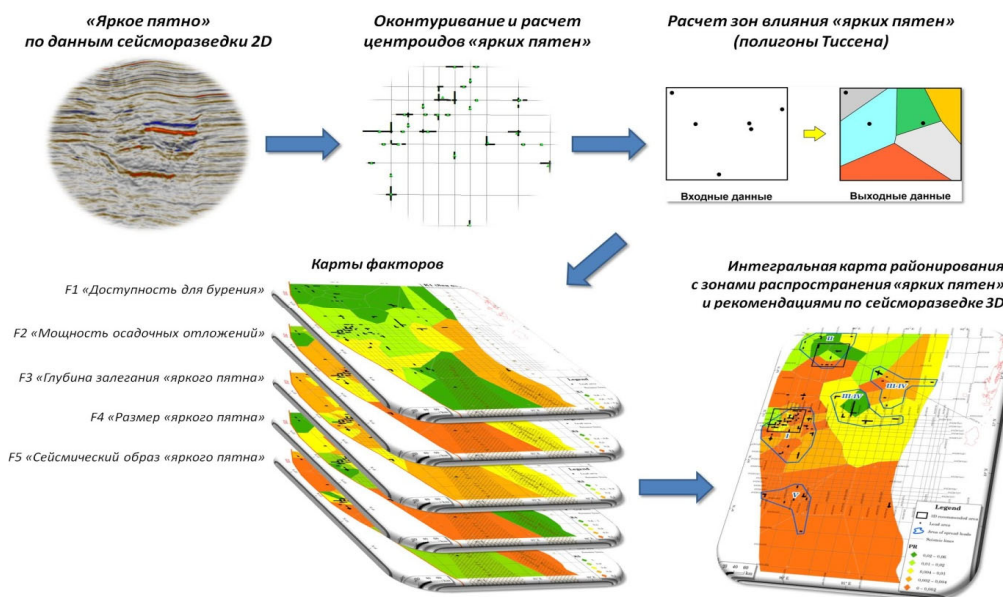


Рис. 2. Схема создания интегральной карты районирования геологических рисков ярких пятен, перспективных по данным морской сейсморазведки 2D

Итоговая карта районирования использовалась для оконтуривания зон распространения ярких пятен и оценки перспективности их дальнейшего изучения в рамках поисково-оценочного этапа ГРР. В результате в наиболее перспективных зонах, расположенных в северо-западной и западной части исследуемой акватории, рекомендовано проведение детальных сейсморазведочных работ 3D и комплексных геофизических и геохимических исследований в целях уточнения геологического строения и определения оптимальных мест постановки на бурение поисковых и оценочных скважин.

Рассмотренные примеры использования различных методов геоанализа показывают основные возможности геоинформационного картографирования геологических рисков (табл. 3). В условиях слабой геолого-геофизической изученности сочетание методов риск-анализа и геоанализа позволяет генерально оценить перспективы проведения ГРР в пределах исследуемой территории/акватории. Последующая детализация оценки геологических рисков зависит от получения большего количества актуальных и достоверных данных, характеризующих различные факторы осадконакопления и условия добычи.

Таблица 3

Сравнительная характеристика рассмотренных примеров геоинформационного картографирования геологических рисков

Область работ	Северная часть Омской области, РФ	Юго-восточная часть Бенгальского залива
Параметры		
Этап ГРР	Поисково-оценочный	Региональный
Изученность	Слабая (бурение и сейсморазведка)	Минимальная (сейсморазведка)
Плотность сейсморазведки	0,26 пог. км / кв. км	0,1 пог. км / кв. км
Набор факторов риска (количество факторов)	Стандартный (3)	Нестандартный (5)
Минимальный объект картографирования	Участки недр и объекты оверлейного анализа	Полигоны Тиссена
Шкала значений	Качественная (три показателя)	Количественная нормированная (от 0 до 1)
Методы геоанализа	Анализ атрибутивной информации. Оверлейные операции	Анализ атрибутивной информации. Зонирование
Результаты	Определение нефтегазового потенциала лицензионных участков недр	Рекомендации на проведение детальных геофизических исследований

Заключение

Использование методов геоанализа в картографировании геологических рисков позволяет осуществлять работу с геоданными, которые характеризуют

факторы, участвующие в риск-анализе. Как показано в настоящем исследовании, картографическая визуализация значений факторов выполняется в пределах минимальной единицы картографирования, в качестве которой в зависимости от степени геолого-геофизической изученности могут быть как лицензионные участки недр, так и рассчитанные модельные объекты, включая зоны влияния. При этом значения геологических рисков могут быть представлены как в качественном, так и в количественном выражении вне зависимости от выбранной методики расчета. Таким образом, карты районирования в наглядной форме отображают пространственное распределение вероятности успеха поиска залежей углеводородов, а геоинформационное картографирование геологических рисков способствует оценке перспективности нефтегазоносности по доступным параметрам в районах со слабой геолого-геофизической изученностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Истратов И.В., Бондарев А.В. Риски ГРП на нефть и газ и оценка геологических рисков // *Offshore*. – 2018. – №5. – С. 14–19.
2. Евстафьев И.Л., Долинский И.Г. Оценка геологических рисков при планировании геологоразведочных работ на стадии поиска месторождения // *Вести газовой науки*. – 2018. – №4 (36). – С. 19–23.
3. Поляков А.А., Мурзин Ш.М. Международный опыт анализа геологических рисков // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2012. – Т. 7. – №4. – 29 с.
4. Емельянова Н.М., Пороскун В.И. Методика вероятностной оценки ресурсов нефти и газа участков недр с учетом зависимости геологических рисков агрегируемых локальных объектов по площади и разрезу // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2021. – Т. 16. – №3. – 19 с. – DOI: 10.17353/2070-5379/28_2021
5. Красильников П.А. Использование геоинформационных систем для решения прогнозных инженерно-геологических задач при разработке месторождений полезных ископаемых // *Вестник Пермского университета. Геология* – 2020. – Т. 19. – №1. – С. 65–72. – DOI: 10.17072/psu.geol.19.1.65
6. Молочко А.В. Геоинформационное картографирование геоэкологических рисков эксплуатации нефтяных месторождений (на примере Саратовской области) // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле*. – 2010. – Т. 10. – №1. – С. 35–40.
7. Шокин Ю.И., Москвичев В.В., Ничепорчук В.В. Методика оценки антропогенных рисков территорий и построения картограмм рисков с использованием геоинформационных систем // *Вычислительные технологии*. – 2010. – Т. 15. – №1. – С. 120–131.
8. Логинов Д. С., Крылов С. А. Формализация процесса принятия решения по включению геофизических карт в комплексные атласы // *Геодезия и картография*. – 2020. – Т. 81. – № 10. – С. 16–29. – DOI: 10.22389/0016-7126-2020-964-10-16-29
9. Угаров А.Н. Районирование по показателям риска с использованием ГИС // *CADmaster*. – 2007. – №1. – С. 61–65.
10. Забанбарк А. Нефтегазоносный бассейн Бенгальского залива – потенциальный углеводородный резерв Южной Азии // *Океанология*. – 2004. – Т. 44. – №5. – С. 778–783.
11. Ullah, S., Ani Khan, A. and Hossain A. Spatiotemporal variability of rainfall in Bangladesh: using Thiessen polygon and spline interpolation // *Oriental Geographer*. – 2014. – Vol. 58. – No 2. – Pp. 91–111.
12. Olawoyin, R. and Kwabenah Acheampong P. Objective assessment of the Thiessen polygon method for estimating areal rainfall depths in the River Volta catchment in Ghana // *Ghana Journal of Geography*. – 2017. – Vol. 9(2). – Pp. 151–174. – DOI: 10.4314/GJG.V9I2

13. Орехова Е.А., Плякин А.В. Полигоны Вороного в исследовании факторной структуры потенциала экономического развития муниципальных районов // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Серия: Экономика. Информатика. – 2014. – 21 (192). – С. 28–41.

14. Liu, X., Ye, F., Liu, Y., Xie, X. and Fan, J. Real-Time Forecasting Method of Urban Air Quality Based on Observation Sites and Thiessen Polygons // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2015. – Vol. 8. – No. 4. – Pp. 2065–2082. – DOI: <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-843>

© Д. С. Логинов, 2023