

УДК 551.35, 556.3.01, 556.388

О.В. Голованова¹, К.Е. Питьева²**ВОДОНОСНЫЙ КОМПЛЕКС НЕОПЛЕЙСТОЦЕНА
В РЕГИОНЕ РАЗРАБОТКИ АСТРАХАНСКОГО
ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ:
СПЕЦИФИКА, СТРУКТУРЫ, МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ**

Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Geological Institute of the RAS, 119017, Moscow, Pyzhevsky lane 7, bld. 1.
Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

В статье развиваются представления о геологических процессах, лежащих в основе гидрогеологических и гидрогеохимических построений, моделирования и управления природно-техногенными системами. Инициатором работы была Клара Ефимовна Питьева, профессор кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ, многие годы возглавлявшая комплексные гидрогеологические исследования в области разработки Астраханского газоконденсатного месторождения, результатами которых стали фундаментальный фактический материал, многие научные и практические выводы.

Статья посвящена светлой памяти К.Е. Питьевой.

Представлены результаты анализа материалов исследований осадочных водопородных комплексов неоплейстоцена: литологических, минералого-геохимических, гидрогеохимических, гидрогеофильтрационных и гидрогеомиграционных в районе разработки Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ). Сформулированы основные положения модели формирования подземных вод, специфики их баланса, химического состава, гидрогеодинамики, гидрогеомиграции, а также выявлены основные управляющие факторы. Выявлено преобладание морских отложений в сложнопостроенных комплексах неоплейстоцена, установлена значительная роль глинистых пластов и фрагментарность следов континентального развития. Идентифицированы фации и обстановки осадконакопления, характерные для крупных авандельт и неглубоководной области Северного Каспия. Рассмотрена система дельт и авандельт крупных и мелких водотоков с привлечением геоморфологических, ландшафтно-климатических и геодинамических факторов для развития модели формирования изучаемой толщи. В верхней части лито- и гидросферы в области АГКМ выявлен специфический ландшафтно-геоморфологический рисунок, отражающий системы зон геодинамической неустойчивости с масштабом несколько сотен метров–километров.

На значительной части территории исследования выявлена ассоциация областей с наибольшей мощностью и проводимостью водоносных пластов неоплейстоценового комплекса с межкупольными депрессиями глубинных структур галокинеза. Полученные результаты актуальны для развития модели формирования водопородных комплексов неоплейстоцена и управления разработкой АГКМ: выявления путей распространения загрязнений, снижения риска аварийных ситуаций из-за неустойчивости фундаментов сооружений газового комплекса и многих других.

Ключевые слова: неоплейстоцен, Северный Прикаспий, условия формирования, лавинная седиментация, авандельта, неотектоника, галокинез.

The paper presents an analysis of materials from studies of the Neopleistocene sedimentary complexes and aquifer system: lithological, mineralogical-geochemical, hydrogeochemical, hydrogeofiltration and hydrogeomigration in the region of development of the Astrakhan gas condensate field (AGCF). The main provisions of the model of the formation of groundwater, the specifics of their balance, the chemical composition of hydrogeodynamics, hydrogeomigration, and the main governing factors are formulated. The predominance of marine sediments in complexly constructed strata of the Neopleistocene, with a significant role of clay layers and fragmentary traces of continental development, was revealed. Facies and sedimentary environments characteristic of large deltas and shallow marine areas, like the modern North Caspian, have been identified. The system of deltas and deltas of large and small streams is considered with the involvement of geomorphological, landscape-climatic and geodynamic factors for the development of a model for the formation of the studied strata. In the upper part

¹ Геологический институт РАН, канд. геол.-минер. н.; e-mail: golovanova2000@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, профессор, докт. геол.-минер. н.

of the litho-hydrosphere of the AGKM region, a specific landscape-geomorphological pattern was revealed, reflecting the systems of zones of geodynamic instability on a scale of the first hundreds of meters-kilometers.

In a significant part of the study area, an association of areas of the greatest thickness and conductivity of aquifers of the Neopleistocene complex with interdome depressions of deep halogenetic structures was revealed. The results obtained are relevant for the development of a model for the formation of aquatic-rock complexes of the Neopleistocene and management of the development of AGCF: identifying ways of spreading pollution; reducing the risk of accidents due to the instability of the foundations of the gas complex facilities and many others.

Key words: Neopleistocene, Northern Caspian Sea, conditions of formation, sedimentary environment avalanche sedimentation, avandelta, neotectonics, halokinesis.

Введение. Регион Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ) представляет значительный научно-практический интерес как из-за специфики условий формирования водопородных комплексов неоплейстоцена, так и в связи с экологическими проблемами разработки месторождения. Мы изучали формирование подземных вод и пород неоплейстоценового водоносного комплекса вместе с взаимосвязанными средами для обоснования надежной системы управления разработкой АГКМ. Нами разработана новая модель формирования подземных вод, суть которой может быть заключена в следующих основных позициях [Голованова, 2015, 2018]:

- отложения водоносного комплекса неоплейстоцена накапливались в условиях лавинной седиментации с нарушением механической дифференциации материала в ходе циклической трансгрессивно-регрессивной истории Каспия, что обусловило отсутствие типичной системы водоносных и слабопроницаемых пластов;

- весьма низкие значения скорости геофильтрации и геомиграции по латерали определили в изучаемой системе сохранность седиментогенных вод морских бассейнов неоплейстоцена;

- геохимические изменения пород и вод неоплейстоценового комплекса происходят согласно классической схеме раннего диагенеза.

Основными условиями и факторами состояния вод в осадочном бассейне при этом признаны региональные структурно-тектонические условия, уклоны морского дна и прилегающей суши, гидравлические градиенты, масштаб среднесного-летнего количественного вклада питания метеогенными водами, ландшафтно-климатические условия, геоморфологический фактор, геодинамический фактор, проводимость геофильтрационных сред и др.

В статье углублены наши представления о причинах неоднородности разреза неоплейстоцена, особенно об условиях формирования наиболее водопроницаемых пластов с высокой проводимостью, так как именно к ним приурочены основные массопотоки.

Значительная роль климатического фактора изменений уровня Каспийского моря в неоплейстоцене не вызывает сомнения [Панин и др., 2014]. В связи с этим основные усилия исследователей

предпринимаются с целью увязать на все более и более детальном уровне трансгрессивно-регрессивный цикл Каспия с колебаниями уровня Мирового океана и ледниковыми событиями на Восточно-Европейской платформе. Однако такую модель развития вряд ли можно назвать полной. Колебания уровня Каспийского моря характеризуются значительной сложностью и часто не могут быть корректно связаны с количеством атмосферных осадков и речным стоком [Леонов, 1997; Лаврушин и др., 2014]. Это показывают и проблемы корреляции местных подразделений неоплейстоцена Каспийско-Черноморской области с международной изотопно-кислородной шкалой [Янина, 2012].

Прикаспийская депрессия по многим позициям — уникальный природный объект. Она характеризуется абсолютными отметками ниже уровня Мирового океана и представляет собой масштабную территорию с полого наклонным и слаборасчлененным рельефом, в ходе истории неоплейстоцена многократно становившуюся морским дном. В этом смысле ей во многом соответствует современный неглубоководный Северный Каспий, очень слабый уклон земной поверхности которого обуславливает значительные перемещения береговой линии моря даже при самых малых изменениях объема воды в бассейне.

Наиболее крупным поставщиком пресной воды и осадочного материала в Каспий ныне служит р. Волга, в нижнем течении разделяющаяся на рукава, а еще ниже образующая обширную дельту. На космических снимках также хорошо заметны ранее существовавшие водотоки [URL: <https://www.google.ru/maps/place/Астраханская+обл./@.....>]. Наиболее яркий их представитель — Сарпинско-Даванская (ныне сухая) долина и дельта, отличающаяся не столь глубоким врезом, как долина Волги. Менее крупные потоки и дельты визуализируются в районе склонов Ергеней, Кизлярского залива и пр. Аналогичные структуры найдены и на Северном Каспии [Каспийское..., 1989]. Таким образом, область Северного Прикаспия и Каспия — арена развития целой системы разновозрастных крупных и мелких долин и дельт. Вопросы времени их функционирования дискуссионны. Также острые дискуссии вызывают вопросы объема, состава, на-

правления и распределения стока, что определяет формирование тех или иных фаций. В верхней части гидrolитосферы изучаемого аридного региона широко распространены неоднородности балансовых соотношений испарения и метеогенного инфильтрационного питания, отвечающие за пестроту химического состава подземных вод [Питьева и др., 2005]. Значительную роль при этом играют структурные и ландшафтно-геоморфологические особенности, что требует дополнения модели формирования рассмотрением вклада геодинамических процессов и факторов.

Низменность Северного Прикаспия отличается еще одной важной особенностью — значительной степенью унаследованности неотектонических проявлений от глубинных структур [Астраханский..., 2008; Панина, Зайцев, 2014]. Утоненная земная кора, интенсивный тепловой поток, кунгурский галокинез [Хуторской, 2004, 2010], все это создает предпосылки непрекращающегося действия эндогенной энергии в неоплейстоценовых комплексах. При этом корни массопотоков снизу могут находиться как в залегающих ниже мезозойско-кайнозойских комплексах, так и в более древних, вплоть до фундамента. В связи с этим в ходе наших исследований мы стремились установить возможные соотношения выявленных нами особенностей строения неоплейстоценового водоносного комплекса с глубинными структурами галокинеза и консолидированной коры.

Материалы и методы исследований. Фундаментальный фактический материал получен в процессе разработки, эксплуатации и комплексного экологического мониторинга природных вод и взаимосвязанных с ними сред Астраханского газоконденсатного месторождения. Это данные Астраханской партии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (научный руководитель проф. К.Е. Питьева), материалы гидрогеологической, инженерно-геологической съемки, аэрофотосъемки и геофизических исследований (Л.Ф. Кривко, А.Е. Лютницкий, И.К. Акуза, В.В. Силантьев), материалы АстраханьНИНПГАЗа, ТИСИЗа, ГИПРОВОДХОЗа и др. [Питьева, Голованова, 2001, 2005; Голованова, 2015, 2018].

Рассмотрено более 150 разрезов скважин глубиной 25–30 м (верхний неоплейстоцен), 50 скважин глубиной 40 м (включая верхи среднего неоплейстоцена), 20 скважин глубиной 80 м (вскрывающих верхи нижнего плейстоцена), систематизированы данные более 200 режимных наблюдательных скважин мониторинга подземных вод. Получены тысячи определений уровня, глубины залегания, минерализации и химического состава подземных вод; десятки и сотни определений литологических, гранулометрических, минералого-геохимических, воднофизических, геофильтрационных и прочих характеристик. Площадь района исследования составляет около 2000 км².

Мы рассматриваем формирование пород и вод начиная с этапа седиментации. Большое внимание уделяется исследованию обстановок осадконакопления, механизмов дифференциации осадочного материала, а также фациальному анализу. Используются статистические методы систематизации данных и графо-аналитические построения, методы схематизации, типизации, районирования. Конкретные полевые и лабораторные методы получения тех или иных показателей состава и свойств пород, вод и взаимосвязанных сред приведены в соответствующих разделах исследования [Голованова, 2015; 2018]. Для анализа геолого-структурных условий, неотектоники и геодинамики региона, включая вопросы геотермии, привлечены литературные данные [Астраханский..., 2008; Панина, Зайцев, 2014; Хуторской, 2004, 2010].

Результаты исследований и их обсуждение.
Условия формирования и строение водоносного комплекса неоплейстоцена. Анализ полученных данных показал, что на протяжении всего неоплейстоцена область АГКМ характеризуется преимущественно морским осадконакоплением. Состав пород соответствует характерным фациям неглубоководного шельфа моря (до 65–80 м) и авандельты — области лавинной седиментации 1-го уровня при воздействии крупной реки [Каспийское ..., 1989; Лисицын, 1988; Хрусталева, 1978; Голованова, 2015, 2018]. Все породы содержат типичные продукты ранней стадии диагенетического минералообразования в морских осадках: гидроксиды железа и марганца (в виде конкреций), пирит и другие сульфиды, кристаллический гипс (в виде друз и роз) [Тагеева, Тихомирова, 1962]. Окислительно-восстановительный потенциал пород независимо от глубины залегания колеблется в пределах от 100–300 (глинистые разности) до 700–800 мВ (пески). Содержание сингенетического карбоната и гипса невелико, до 1% и до 2% соответственно. Сапропелитовые прослои не обнаружены.

Изучаемый разрез отложений неоплейстоцена построен исключительно сложно, он характеризуется переслаиванием песчаных и алевроитово-глинистых пород различных литогенетических типов переменной мощности при отчетливом преобладании последних. Систематизация строения этой толщи выполнена на основе анализа обстановок осадконакопления и обусловленной ими литогенетической специфики.

Анализ кривой колебания уровня Каспия, палеогеографические реконструкции различных авторов использованы нами для стратификации разреза на уровне основных этапов неоплейстоцена, не вызывающих серьезных разночтений [Федоров, 1978; Янина, 2012]. Для установления в разрезе следов континентальных этапов развития мы ориентировались на остатки корневой системы травянистой растительности, реже на растительные

остатки и в единичных случаях на гумус. Они зафиксированы на двух уровнях: на глубине 10–15 м (в 20 скважинах из 150), на глубине 30–35 м (в 2 скважинах из 50). Следы почвообразования не обнаружены. На уровне 10–15 м отмечено изменение желтого и бурого цвета отложений (выше) на преимущественно серый (ниже).

Таким образом, нами выделены отложения следующих трансгрессивно-регрессивных этапов неоплейстоцена: позднего (хвалынские и хазарские) до глубины 5–15 м; среднего (верхне-, средне- и нижнехазарские) на глубине от 5–15 до 50–70 м и раннего (бакинские) на глубине свыше 50–70 м (рис. 1).

Наиболее выдержанные по мощности водоносные пласты, представленные преимущественно песчаными водоносными литолого-генетическими типами, распространены на двух уровнях, маркируемых следами континентального развития. Первый уровень — до глубины 10–15 м (верхний неоплейстоцен), второй — на глубине 15–40 м (средний неоплейстоцен). Ниже по данным разрезов 20 скважин залегает третий водоносный пласт, вероятно, фрагментарного распространения. На глубине 50–70 м залегает толща бакинских отложений, преимущественно глинистых, слабопро-

ницаемых, она представляет собой региональный водоупор водоносного комплекса неоплейстоцена.

Нами разработана типизация строения разреза изучаемых отложений, отражающая характер напластования и изменение количественных показателей внутреннего строения пластов от их мощности (рис. 1, таблица). Тип I имеет один пласт, представленный преимущественно песчаными водоносными литолого-генетическими типами пород. Его общая мощность 20–30 м и больше. Тип II характеризуется двухпластовым строением: два пласта преимущественно водоносных отложений разделены в основном слабопроницаемым пластом. Его подтипы имеют разную мощность верхнего водоносного пласта: II.1 — 7,5–15 м, II.2 — 2,5–7,5 м и II.3 — < 2,5 м. Распространение этих типов в области АГКМ отражено на схеме соотношения с глубинными структурами галокинеза (рис. 2), о чем подробно речь пойдет ниже.

Особо отметим, что намеченные нами уровни (рис. 1) не горизонтальные. Колебание глубины залегания их границ достигает 5–10 м, местами >15 м, что связано, по всей видимости, с колебанием высотных отметок палеорельефа и отвечает за фрагментарность распространения фаций. Так, например, в области разработки АГКМ не

Типизация литолого-геофильтрационного строения водоносного комплекса неоплейстоцена в районе АГКМ

Характеристики	Типы строения						
	I — однопластовое		II — двухпластовое				
Литологическая характеристика	Пески мелко- и тонкозернистые, среднезернистые, желтые, вниз по разрезу серые, с обломками морской фауны, с прослоями глин (суглинков) мощностью до 2 (5) м, общая мощность 20–30 м		Чередование слоев песков и глин; слои мелко- и тонкозернистых песков, верхние (Q _{IV} –Q _{III}) — желтые и бурые, нижние (Q _{II}) — серые и бурые, разделены слоем глин (Q _{II}) серых (бурых и голубых) оттенков, с существенной примесью песчаного и алевритового материала в рассеянном виде, в виде линз и прослоев; мощность нижнего слоя песков — от 0 до 20 м; мощность слоя глин — от 5 до 20 м				
			мощность верхнего слоя песков (Q _{IV} –Q _{III}), м				
			II.1		II.2		II.3
			7,5–15		2,5–7,5		2,5
	I.1	I.2	II.1.1	II.1.2	II.2.1	II.2.2	преимущественно алевриты
	преимущественно пески	пески перекрыты слоями глин мощностью до 2(5) м	преимущественно пески и алевриты	пески и алевриты, перекрытые слоями глин мощностью до 2(5) м	преимущественно алевриты и пески	алевриты и пески, перекрытые слоями глин мощностью до 2(5) м	
Геофильтрационное строение	однородный пласт	двухслойный пласт	однородный пласт	двухслойный пласт	однородный пласт	двухслойный пласт	однородный пласт
Проводимость пластов, м ² /сут	100 (70–190)*		верхнего пласта (Q _{IV} –Q _{III})**				
			45 (15–95)		18 (5–38)		2,5 (1,5–6,25)
			нижнего пласта (Q _{II}) — 1,5–190*				
Условия и обстановки формирования отложений	относительно неглубоководные (до 50–80 м) условия моря и аванделты; лавинная седиментация с различной степенью нарушения механической дифференциации осадочного материала						
	воздействие стоковых течений крупных водотоков		воздействие стоковых течений системы водотоков различной кинетической энергии				

* Среднее (минимальное и максимальное) значение по данным откачек; ** то же, рассчитано по данным лабораторных определений коэффициента фильтрации.

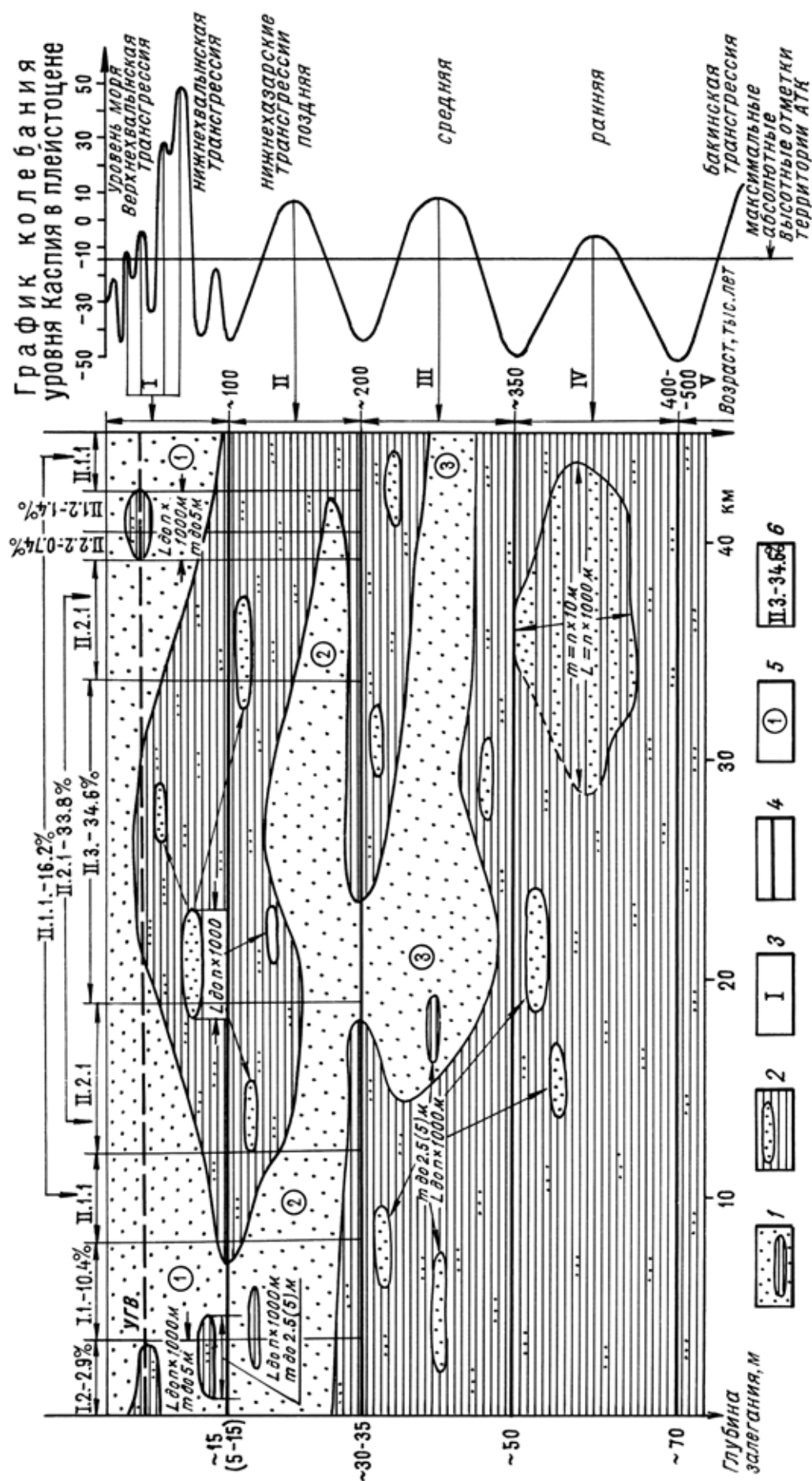


Рис. 1. Схема строения водоносного комплекса неоплейстоцена в районе АГКМ: преобладающие литологические разности: 1 — пески и алевроиты; 2 — алевроитово-глинистые; 3 — главные этапы осадконакопления неоплейстоцена: 1 — верхнего, II–IV — среднего, V — нижнего; 4 — уровни залегания отложений главных этапов неоплейстоцена; 5 — песчано-алевритовые пласты (1 — верхнего, 2, 3 — среднего неоплейстоцена); 6 — тип литолого-геофиль-градиционного строения с частотой встречаемости [Голованова, 2015]

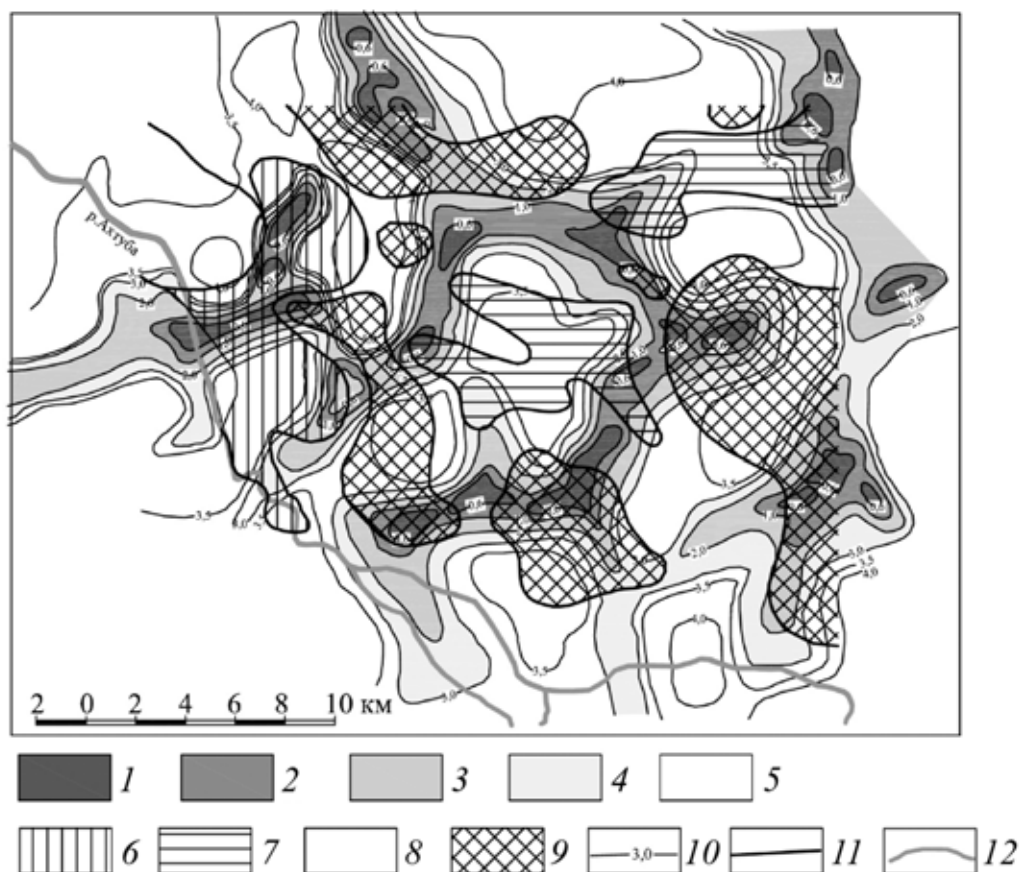


Рис. 2. Схема соотношения мощности верхнего водоносного пласта неоплейстоценового комплекса и структур солевого комплекса P_{1kg} : 1–5 — районы с разными условиями залегания соленосных отложений P_{1kg} : 1–3 — солевые купола-диапиры; 4–5 — межкупольные понижения; глубина залегания кровли P_{1kg} в условиях 1–5, км (1 — $< 0,6$; 2 — от 0,6 до 1,0; 3 — от 1,0 до 2,0; 4 — от 2,0 до 3,0; 5 — $> 3,0$); 6–9 — районы с разным типом строения водоносного комплекса неоплейстоцена, с разной мощностью верхнего водоносного пласта [Голованова 2015, 2018]: 6 — тип I.1, мощность > 20 –30 м; 7 — тип II.1.1, мощность 7,5–15 м; 8 — типы строения с мощностью 2,5–7,5 м; 9 — тип II.3, мощность $< 2,5$ м; 10 — изогипсы глубин залегания кровли солевого комплекса, км; 11 — границы районов разного строения водоносного комплекса неоплейстоцена; 12 — реки современной сети

обнаружены шоколадные хвалынские глины, приуроченные к наиболее глубоким эрозионным врезам палеорельефа [Свиточ, 2015]. В области разработки АКГМ распространены только их более мелководные фациальные аналоги. Приуроченные к наиболее глубоким врезам области долин самых крупных водотоков нижней Волги (р. Волга, р. Бузан), отличающиеся и в настоящее время аридного климата повышенным увлажнением, сохраняют свою ландшафтно-климатическую специфику и представляют собой «цветущие сады» рядом с огромными территориями пустыни, на которых расположены, в том числе, и сооружения газового комплекса АГК.

Геоморфологическая, ландшафтно-климатическая и геодинамическая специфика водопородных комплексов неоплейстоцена и их соотношение с глубинными структурами фундамента. Главные особенности рельефа Прикаспийской низменности — его очень слабая его расчлененность (несколько метров) и очень слабый общий уклон к Каспийскому морю (0,0001–0,0003). Здесь большей частью распространены типы рельефа, сформированные в результате воздействия Ка-

спийского моря и поверхностного стока (р. Волга и др.). Широко распространены типы рельефа, связанные с деятельностью ветра (эоловые пески). Встречаются поднятия, обусловленные соляной тектоникой, гора Большое Богдо, горы Эльтона и менее выраженные в рельефе погребенные поднятия Астраханско-Актюбинской системы, о которых речь пойдет ниже.

Геоморфологический фактор играет значительную роль в увлажнении изучаемого в целом аридного региона и, следовательно, в формировании неоднородности химического состава подземных вод в верхней части неоплейстоценового комплекса. По степени увлажнения здесь выделяют пустынный район (Аксаарайские степи, массив Рын-пески) и район промежуточного смягченного климата (пойма и дельта Волги). На более детальном уровне неравномерность увлажнения связана с изменениями баланса инфильтрационно-конденсационного питания и испарения, которые зависят от геоморфологических условий, характера почв и растительности, литологического состава и фильтрационных свойств пород зоны аэрации, антропогенного воздействия и других факторов

[Питьева, Голованова, 2005]. Рельеф определяет площадное перераспределение влаги, поступающей на поверхность земли в виде атмосферных осадков, и неравномерность условий испарения, создающихся в зонах с понижением глубины залегания подземных вод меньше 3 м. Растительность регулирует влагообмен между почвой и воздухом, защищает почвы от выветривания и загрязнения. Деятельность человека большей частью способствует загрязнению, деградации растительного покрова и опустыниванию.

Регион Астраханского ГКМ благодаря детальной изученности данными бурения сотен скважин и аэрофотосъемки охарактеризован детальной ландшафтно-геоморфологической схемой, позволяющей наблюдать неоднородности масштаба нескольких сотен метров. Фрагмент этой карты в схематичном виде характеризует контуры и соотношения морских и эоловых отложений территории (рис. 3). Отложения морской аккумулятивной равнины представлены песчаными, супесчаными, редко глинистыми разностями, они зафиксированные, часто относительно пониженной геоморфологической позиции, нередко с растительностью тамариска и др. Эоловые (перемещаемые ветром) песчаные отложения характеризуются наиболее повышенными высотными отметками, на них практически нет растительности. Наиболее пониженными высотными отметками характеризуются участки ныне существующих и исчезнувших соляных озер. Ландшафтно-геоморфологический рисунок представляет собой сеть с размером ячеек от нескольких сотен метров до нескольких километров. В центральной части схемы (рис. 3) показано их ортогональное пересечение с солевым озером. Это озеро хорошо просматривается на современных космических снимках территории в 10 км на северо-восток от пос. Аксарайский [URL: <https://www.google.ru/maps/place/Аксарайский>]. Ориентировка основных направлений сети: северо-запад — юго-восток и северо-восток — юго-запад.

Детальный ландшафтно-геоморфологический рисунок территории АГКМ, по всей видимости, отражает систему зон геодинамической неоднородности в масштабе нескольких сотен метров—нескольких километров. Геодинамические зоны — линейно вытянутые структуры нестабильного напряженно-деформационного состояния геологической среды — чередуются с относительно стабильными блоками, разделяя их и составляя своеобразную сеть. Совокупность сетей геодинамических зон разного иерархического уровня с размером блоков-ячеек от нескольких метров до нескольких десятков километров и более составляет геодинамическую структуру литосферы. В верхней части земной коры природа геодинамической нестабильности чаще всего связана с неравномерностью скорости вращения Земли с периодом от часов до многих лет, также

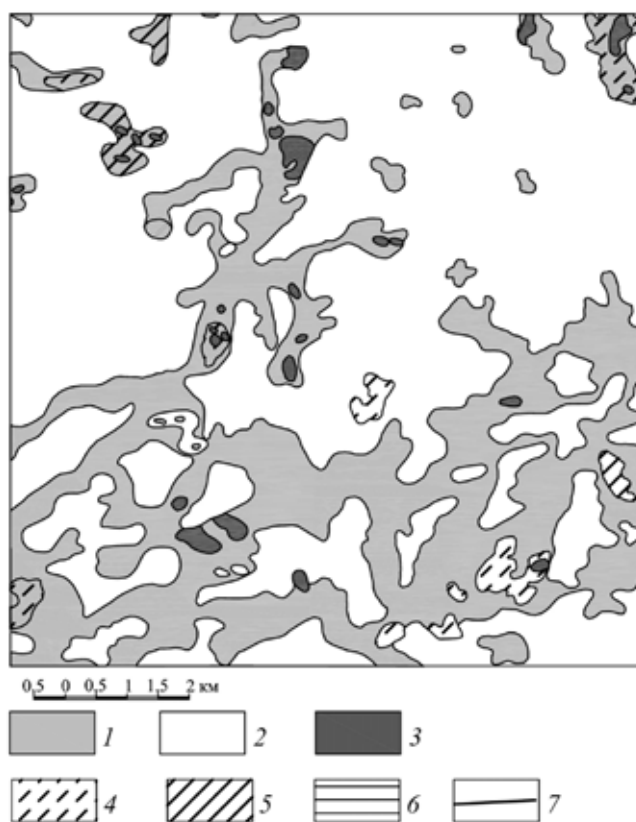


Рис. 3. План-схема распределения морских закрепленных отложений неоплейстоцена, озерных и незакрепленных эоловых отложений голоцена в районе эксплуатационных скважин АГКМ: 1 — морские отложения Q_{IIIth} , ассоциирующие с понижениями рельефа; 2 — эоловые отложения, преимущественно песчаные, перемещаемые ветром; 3 — озерные отложения, часто с солями, в наиболее пониженной геоморфологической позиции; 4–6 — литологический состав отложений: 4 — супеси, 5 — суглинки, 6 — глины, 7 — границы морских, эоловых и озерных отложений

здесь действуют приливные, ротационные, изостатические и глубинные неотектонические процессы. Неотектонические процессы развиваются в длительном интервале времени (миллионы лет) и оставляют свои следы в виде геоморфологической информации. Это позволяет, применяя комплекс методов дешифрирования и прямые измерения (грунтовые реперы, газовая съемка), моделировать неотектонические процессы различного масштаба [Зональные..., 2003; Панина, Зайцев, 2014; Селюков, Стигнеева, 2010; Сидоренков, Гамбурцев, 2013].

В результате исследования неотектонических процессов в Прикаспийской впадине чаще всего выявлено прямое соотношение новейших структур с рельефом фундамента [Астраханский..., 2008; Панина, Зайцев, 2014]. Астраханско-Актюбинская система сводовых поднятий субширотного простирания отражает строение консолидированной коры, поднятия ассоциируются с выступами фундамента. С запада на восток распространяются Юстинско-Астраханский, Северо-Каспийский, Гурьевский и Биикжалский геоблоки, каждому из которых соответствует сводовое поднятие, образованное

девонско-каменноугольными карбонатными массивами с уникальными по масштабам залежами углеводородов. Изучаемое нами Астраханское газоконденсатное месторождение приурочено к Астраханскому массиву.

Глубина залегания кровли фундамента под Астраханской карбонатной платформой составляет в левобережной части долины р. Волга 8 км, а в правобережной — 11 км. Резкое изменение глубины залегания связано с крупнейшим разломом с амплитудой смещения >2 км. Этот разлом разделяет Астраханский свод на Юстинский и Астраханский геоблоки. По изогипсе 11,5 км Астраханский свод протягивается в субширотном направлении на расстояние около 200 км при ширине 60 км на западе и 100 км на востоке. Северный и южный борта массива осложнены сбросами. В сторону Сарпинского прогиба, на северо-востоке, прослеживается резкое увеличение глубины залегания кровли консолидированной коры до 15–18 км. Сочленение Сарпинского прогиба и Юстино-Астраханского свода осуществляется по тектоническому нарушению с амплитудой смещения более 1 км. Все эти главные структуры прослеживаются и в современном ландшафтно-геоморфологическом плане, они хорошо видны на космических снимках: пологое куполообразное поднятие песчаной пустыни над Астраханской карбонатной платформой, долина нижней Волги с большим количеством зеленой растительности в линейно вытянутой полосе разлома с заметным понижением рельефа, ныне это сухая Сарпинско-Даванская долина и дельта, огибающая Астраханский массив с запада и северо-запада. На юге она поворачивает почти под прямым углом в сторону Каспия и становится параллельной потокам с Ергеней. Простирание разрывных нарушений, в основном северо-западное и юго-восточное (субмеридианальное), а также субширотное, оно главным образом отражает характер базовых дислокаций фундамента и развивающиеся ныне структуры Кавказского орогена и Скифской плиты. Отражением новейшего тектонического процесса на нижней Волге, вероятно, служит субширотная система линейно ориентированных структур: проток, ериков и, возможно, бугров Бэра (значительную роль в формировании которых, по всей видимости, играет ветровой аэропоток субширотного направления).

Строение неоплейстоценового водоносного комплекса и современный рельеф в соотношении с глубинными структурами галокинеза. Наиболее яркое и специфическое проявление глубинных структур — галокинез отложений кунгурского яруса нижней перми (P_1kg). Вследствие пластичности соленосных отложений и в результате геодинамических событий тектонической, гравитационной и, возможно, элизионной природы [Хуторской, 2004, 2010; Холодов, 2019] кунгурские соли были диффе-

ренцированы на купола-диапиры с максимальной мощностью соли и межкупольные депрессии с минимальной мощностью солевых пластов.

Изучение солянокупольных структур главным образом геофизическими методами сталкивается с большими сложностями из-за неоднородностей геотемпературного поля и скорости распространения сейсмических волн [Астраханский..., 2008; Хуторской, 2010]. По всей вероятности, отдельные блоки Астраханского массива испытывают разнонаправленные движения, создавая геодинамически и геотермически нестабильные зоны разломов, в пределах которых происходит восходящее движение массопотоков, в том числе пластичных солей.

Обобщение данных геотермии показало ассоциацию положительных значений градиентов температуры с антиклинальными структурами, а пониженных — с синклинальными [Хуторской, 2010]. Это дает основания использовать данные геотермии для поиска куполообразных структур. Также выявлена общая тенденция к взаимосвязи формирования месторождений углеводородов с областями повышенных значений геотемпературы и разрывных дислокаций, причем вне зависимости от глубины залегания и структурных соотношений с солевыми комплексами. Астраханское газоконденсатное месторождение, приуроченное к Астраханскому массиву известняков, сформировалось в подсолевом комплексе на глубине свыше 4000 м. Тепловой поток в районе исследования характеризуется повышенными значениями в пределах всего геологического разреза до глубины 50 км. На глубине 1000 м температура составляет 45 °С, в то время как вне поднятия Астраханского свода на той же глубине температура оценивается в 28 °С.

По данным электроразведки в области АГКМ выявлено несколько десятков куполов и межкупольных депрессий (рис. 2). Диапировые структуры не одиночные — в плане они образуют систему линейно вытянутых валов и гряд, пересечения которых (геодинамические узлы с наибольшей нестабильностью) маркируются телами округлой, овальной и звездчатой формы, что иллюстрирует ассоциацию галокинеза с разрывными нарушениями. Сеть разрывных нарушений имеет два основных направления — с северо-запада на юго-восток и с северо-востока на юго-запад. Многие межкупольные понижения имеют в плане близкую к округлой изометричную форму, что может маркировать блочное строение подсолевого комплекса. Сеть солянокупольных структур имеет неплохо выраженную периодичность с шагом 4–8 км. Около 20 овальных округлых и звездчатых солянокупольных структур, геодинамических узлов в области исследования достигают глубины <600 м, погружение в межкупольных депрессиях составляет >3500 м. Столь существенные значения амплитуды глубины залегания надсолевого комплекса выше по разрезу значительно сокращаются.

Осадки кайнозойской группы, залегающие с угловым и структурным несогласием, в существенной степени нивелируют рельеф солянокупольного тектогенеза. Неогеновые апшеронские отложения залегают на глубине 245–690 м (нижняя пачка) и 205–440 м (средняя и верхняя пачки).

В связи с тем, что в неогеновых комплексах амплитуда мощности, обусловленная остатками солянокупольного рельефа, все еще проявляется, мы провели совмещение схем структур галокинеза и строения неоплейстоценового комплекса (рис. 2), которое показало их заметную взаимосвязь. В центральной части схемы наблюдается практическое совпадение области наибольшей мощности верхнего водоносного пласта с областью Аксарайской мульды. В западной части схемы область однопластового строения водоносного комплекса во многом совпадает с областями Ширяевской и Ахтубинской мульды. Является ли эта ассоциация случайностью или закономерностью, смогут показать дальнейшие количественные оценки и инструментальные исследования.

Заключение. Проблема формирования подземных вод и геофильтрационных сред осадочно-породных неоплейстоценовых комплексов в районе АГКМ сохраняет научно-практическую актуальность и в настоящее время. Разработанная нами модель формирования главным образом направлена на установление геолого-генетических основ.

Для объяснения специфики литолого-геофильтрационного строения изучаемого водоносного комплекса мы рассмотрели геоморфологические факторы и геодинамические системы различных иерархических уровней. Анализ ландшафтно-геоморфологических, неотектонических условий и глубинных структур в регионе наших исследований показал, что в настоящее время четко прослеживаются структуры консолидированной коры в вышележащих осадочных толщах. Астраханское сводовое поднятие наследует отчетливый выступ фундамента. Крупные разрывные дислокации с амплитудой смещения более 1–2 км ассоциируются с долиной нижней Волги и Сарпинско-Даванской ложбиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астраханский карбонатный массив: строение и нефтегазоносность / Под ред. Ю.А. Воложа, В.С. Парасны. М.: Научный мир, 2008. 221 с.

Голованова О.В. Подземные воды водоносного комплекса плейстоцена Северного Каспия и Прикаспия. Сообщение 1. Специфика условий водообмена и факторы сохранения седиментогенных вод // Литология и полез. ископаемые. 2015. № 3. С. 258–275.

Голованова О.В. Подземные воды водоносного комплекса плейстоцена Северного Каспия и Прикаспия. Сообщение 2. Значение сохранения седиментогенных вод для развития осадочных бассейнов и палеогеологических реконструкций // Литология и полез. ископаемые. 2015. № 4. С. 362–382.

Залегающие выше по разрезу структуры кунгурского галокинеза в регионе АГКМ организованы в систему геодинамической сети с шагом 4–8 км и ориентировкой северо-запад–юго-восток и северо-восток–юго-запад. В мезозойско-кайнозойских отложениях значения амплитуды глубины залегания, обусловленные рельефом солянокупольных структур, значительно сокращаются. Однако районы наибольшей мощности песчаных пластов и проводимости потоков подземных вод водоносного комплекса неоплейстоцена чаще всего проецируются на глубинные структуры межкупольных депрессий. По всей видимости, в условиях пологонаклонного и слабобасчлененного рельефа даже остаточные флуктуации солянокупольного рельефа оказываются значимым фактором, влияющим на особенности обстановок осадконакопления.

В верхней части изучаемого нами водоносного комплекса неоплейстоцена по рисунку соотношения морских и эоловых отложений проявляется система геодинамических зон в масштабе несколько сотен метров–несколько километров, с преобладающей ориентировкой, как и у зоны неустойчивости более крупных иерархических уровней, северо-запад–юго-восток и северо-восток–юго-запад. Для оценки масштаба неустойчивости в подвижных зонах геогидросферы неоплейстоценового комплекса требуются инструментальные исследования (анализ движения грунтовых реперов, газовая съемка и др.). Учитывая вышесказанное, при моделировании гидрогеофильтрации здесь может быть применима модель гетерогенно-блоковой среды.

Для практики управления АГКМ результаты наших исследований актуальны при решении комплекса задач обоснования и оптимизации управления разработкой АГКМ: подтопление и загрязнение, утилизация отходов АГКМ, устойчивость фундаментов сооружений при просадках и в результате воздействий агрессивных подземных вод, прогнозирование риска аварийных ситуаций и многих других.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ГИН РАН.

Голованова О.В. Значение сохранности седиментогенных вод в водоносном комплексе неоплейстоцена Северного Прикаспия для развития Каспийского осадочного бассейна // Докл. РАН. 2018. Т. 483, № 3. С. 291–295.

Зональные типы биомов России: антропогенные нарушения и естественные процессы восстановления экологического потенциала ландшафтов. СПб., 2003. 246 с.

Каспийское море: Проблемы седиментогенеза / Холодов В.Н., Хрусталева Ю.П., Лубченко И.Ю. и др. М.: Наука, 1989. 182 с.

Лаврушин Ю.А., Спиридонова Е.А., Тудрин А. и др. Каспий: гидрологические события позднего квартала //

Бюлл. Комиссии по изучению четвертичного периода. 2014. № 73. С. 19–50.

Леонов Ю.Г., Волож Ю.А., Антипов М.П. и др. Влияние геологических событий на изменение уровня Каспийского моря // Глобальные изменения природной среды и климата. М., 1997. С. 80–103.

Лисицын А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. М.: Наука, 1988. 308 с.

Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю. Режим составляющих водного баланса Каспийского моря // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 5. С. 488–495.

Панина Л.В., Зайцев В.А. Новейшая тектоника Прикаспия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 1. С. 17–23.

Питьева К.Е., Голованова О.В. Процессы формирования риска загрязнения гидросферы и их моделирование // Проблемы оценки риска загрязнения поверхностных и подземных вод в структуре ТЗК. М.: ВНИИГАЗ, 2001. С. 94–144.

Питьева К.Е., Голованова О.В., Меламед И.Г., Чеховских М.М. Гидрогеохимические условия водоносного комплекса плейстоцена в Нижнем Поволжье. Статья 2 // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2005. № 3. С. 62–68.

Свиточ А.А., Макшаев Р.Р. Шоколадные глины Северного Прикаспия, условия залегания и строение. М., 2015. С. 101–112.

Селюков Е.И., Стигнеева Л.Т. Краткие очерки практической микрогеодинамики. СПб.: Питер, 2010. 176 с.

Сидоренков Н.С., Гамбурцев А.Г. Планетарные атмосферные процессы. Солнечная и геомагнитная активность: Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 5. Человек и три окружающие его среды. М.: Янус-К, 2013. С. 52–68.

Тагеева Н.В., Тихомирова М.М. Геохимия поровых вод при диагенезе морских осадков. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 246 с.

Федоров П.В. Плейстоцен Понто-Каспия. М.: Наука, 1978. 166 с. (Тр. ГИН; вып. 310).

Холодов В.Н. Термобарические обстановки осадочно-породных бассейнов и их флюидодинамика. Сообщение 3. Сверхвысокие давления в стратиферии и соляные диапиры // Литология и полез. ископаемые. 2019. № 2. С. 130–148.

Хрусталева Ю.П. Закономерности современного осадконакопления в Северном Каспии. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1978. 208 с.

Хуторской М.Д., Антипов М.П., Волож Ю.А., Поляк Б.Г. Температурное поле и трехмерная геотермическая модель Прикаспийской впадины // Геотектоника. 2004. № 1. С. 63–72.

Хуторской М.Д., Тевелева Е.А., Цыбуля Л.А., Урбан Г.И. Тепловой поток в солянокупольных бассейнах Евразии // Геотектоника. 2010. № 4. С. 3–19.

Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: био-стратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: МГУ, 2012. 264 с.

Поступила в редакцию 20.01.2021

Поступила с доработки 05.04.2021

Принята к публикации 05.04.2021