

УДК 553.983, 553.982.23

М.С. Топчий¹, Н.В. Пронина², А.Г. Калмыков³, Г.А. Калмыков⁴, М.М. Фомина⁵,
Ю.А. Карпов⁶, Е.В. Козлова⁷, Н.П. Фадеева⁸

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОРОДАХ БАЖЕНОВСКОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ФОРМАЦИИ

Одна из наиболее известных и перспективных сланцевых формаций России — баженовская свита. Неоднозначность представлений о ее геологических особенностях, вызванная сложным и неоднородным строением толщи, привлекает внимание многих исследователей. Нами баженовская свита выделена в совокупности с ее стратиграфическими аналогами в баженовскую высокоуглеродистую формацию (БВУФ). Рассмотрены основные характеристики ее выделения и распространения по площади, а также геологическое строение. Будучи нетрадиционным коллектором углеводородов, БВУФ обладает свойствами нефтематеринской породы, к основным характеристикам которой относятся органическое вещество, его тип и зрелость. Представлены результаты изучения органического вещества различными методиками на микроуровне, а также их интеграция с более крупномасштабными исследованиями. Необходимость детального рассмотрения органического вещества БВУФ обоснована тем, что оно имеет смешанный состав и как следствие разную степень преобразованности и пространственного расположения породе.

Ключевые слова: баженовская свита, органическое вещество, баженовская высокоуглеродистая формация.

One of the most famous and promising shale formations in Russia is the Bazhenov formation. The ambiguity of ideas about its geological features, caused by the complex, heterogeneous structure of the strata, attracts the attention of many researchers. In this work, the Bazhenov formation is singled out in conjunction with its stratigraphic counterparts in the Bazhenov high-carbon formation (BVCHF). In this were considered the main characteristics of its allotment and distribution over the area, as well as the geological structure. Being an unconventional reservoir of hydrocarbons, BVCHF has properties of a petroleum-bearing rock, one of the main characteristics of which is organic matter, its type and maturity. The paper presents the results of the study of organic matter by various methods at the micro level, as well as their integration with larger-scale studies. The need for detailed consideration of the organic matter of the BVCHF is justified by the fact that it has a mixed composition and, as a consequence, a different degree of transformation and spatial distribution.

Key words: Bazhenov formation, organic matter, Bazhenov high-carbon formation.

Введение. Впервые баженовская свита (БС) была выделена и охарактеризована Ф.Г. Гурари в 1959 г. как пачка марьяновской свиты [Брадучан и др., 1986]. Примерно тогда же были получены промышленные притоки нефти из баженовской свиты. С тех пор и до сегодняшнего момента добыча нефти из нее по разным оценкам составила от 11 до 13,3 млн т [Брехунцов, Нестеров, 2010]. Важно отметить, что в геологическом плане не-

которые исследователи рассматривают не только баженовскую свиту, но и ее стратиграфические аналоги. Такое рассмотрение базируется на выделении баженовской высокоуглеродистой формации (БВУФ), которая охватывает позднеюрско-раннемеловой возрастной диапазон (до берриаса включительно) и отличается от вмещающих отложений по наличию концентрированного аквагенного органического вещества (АКОВ),

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* m.s.topchiy@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, профессор, докт. геол.-минер. н.; *e-mail:* gega64@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, доцент; *e-mail:* nvprncl@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail:* a.g.kalmykov@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* fomina-msu@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; *e-mail:* y.a.karpov@yandex.ru

⁷ Сколковский институт науки и технологий, Центр добычи углеводородов, ст. науч. с.; *e-mail:* miliyakozlova@mail.ru

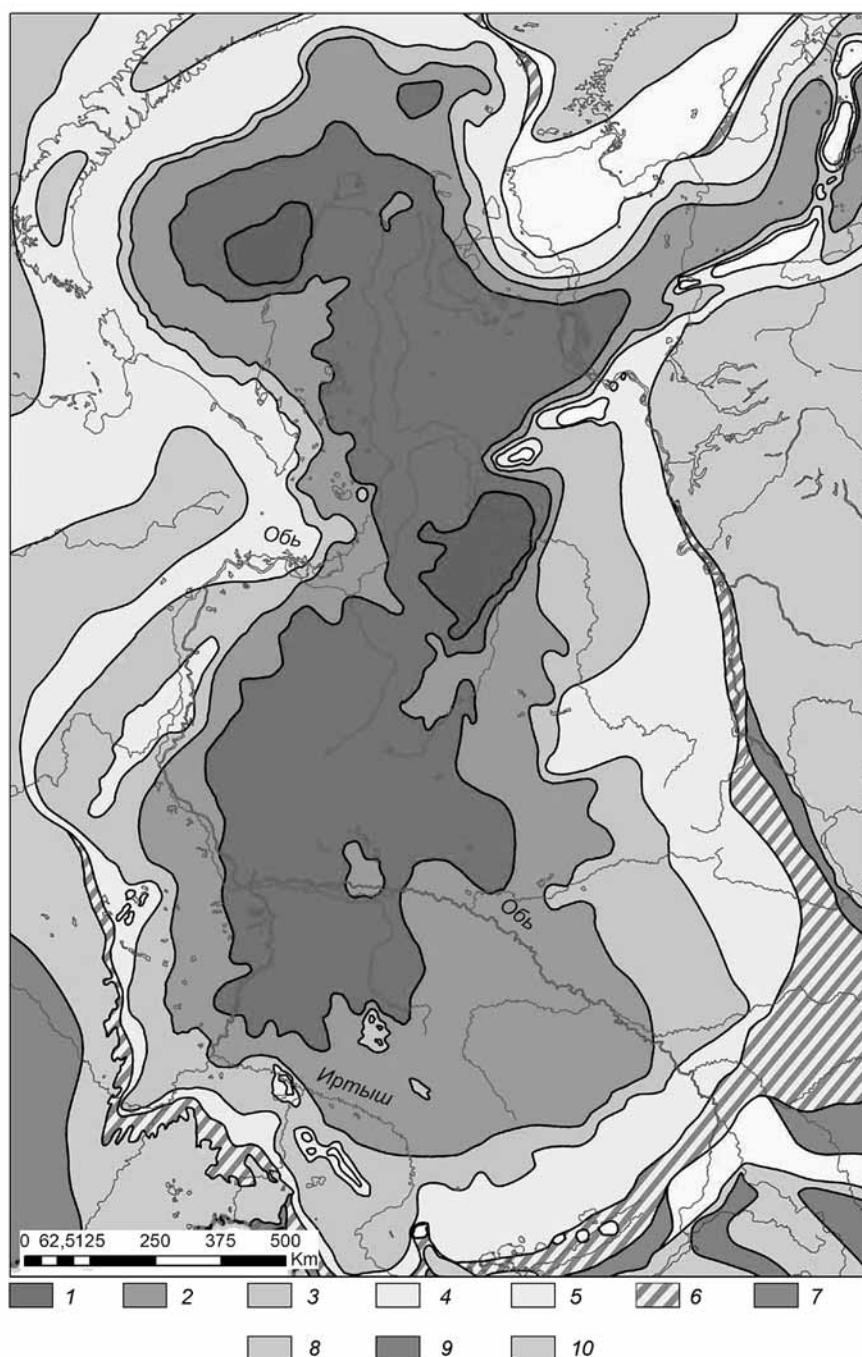
⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, вед. науч. с.; *e-mail:* fadееva_nataly@mail.ru

Рис. 1. Палеогеографическая схема Западной Сибири, волжский век [Конторович и др., 2013]: области морского осадконакопления: 1 — море, глубина >400 м; 2 — море глубокое, 200–400 м; 3 — море, глубина 100–200 м; 4 — море мелкое, глубина 25–100 м; 5 — море мелкое, глубина <25 м; области переходного осадконакопления: 6 — равнина прибрежная, временами заливавшаяся морем (осадки пойменные, озерно-болотные, русловые, дельтовые, береговых баров, пляжевые); области континентального осадконакопления: 7 — равнина низменная, аккумулятивная (осадки русел, пойм, озер и др.); 8 — равнина денудационно-аккумулятивная; области размыва: 9 — равнина возвышенная (денудационная суша), 10 — горы низкие; 11 — государственная граница

??? На схеме10

содержание которого составляет более 2,5% (предложено Н.Б. Вассоевичем) [Баженова и др., 2000]. В данном случае БВУФ включает в себя по латерали не только отложения БС, но и тутлеймской, мулымынской свит, и захватывает часть отложений яновстанской свиты, например, в Мессояхской впадине.

БВУФ обладает сложным строением, повышенным содержанием органического вещества (ОВ) и изменчивостью свойств по территории. При этом фациальные обстановки осадконакопления и вторичные процессы, связанные с изменением литологического состава и преобразованием ОВ, могут приводить к формированию коллекторских прослоев в толще. В то же время проницаемость пористых интервалов иногда невысокая, в свите может содержаться большое количество сорбированных углеводородов (УВ), что предопределяет необходимость проведения дополнительных геолого-технологических мероприятий для получения притока. Такие работы требуют знания о составе и генетической зрелости ОВ, поскольку от этого зависят как коллекторские характеристики (керогеновая пористость), так и количество генерированных УВ и гетероатомных соединений (тяжелые смолы, асфальтены) и адсорбционная способность керогена. При этом исследования ОВ часто ограничиваются стандартным комплексом на макроуровне (пиролиз, иногда экстракция хлороформом из измельченного образца), которые дают обобщенные характеристики.



Наша работа была сфокусирована на комплексном изучении ОВ на микроуровне с целью выявления особенностей его строения и состояния в конкретных образцах, на особенностях распределения УВ в объеме образца, его приуроченности, характеристиках генетической зрелости конкретных органических объектов. Помимо стандартной характеристики пород методом пиролиза нами использованы результаты углепетрографических исследований, анализы методом сканирующей электронной микроскопии, конфокальной микроскопии.

Геологическое строение БВУФ. Время осадконакопления пород БВУФ оценивается как титон–берриас. Исследуемая формация подстилается сложнопостроенной толщей морских карбонат-

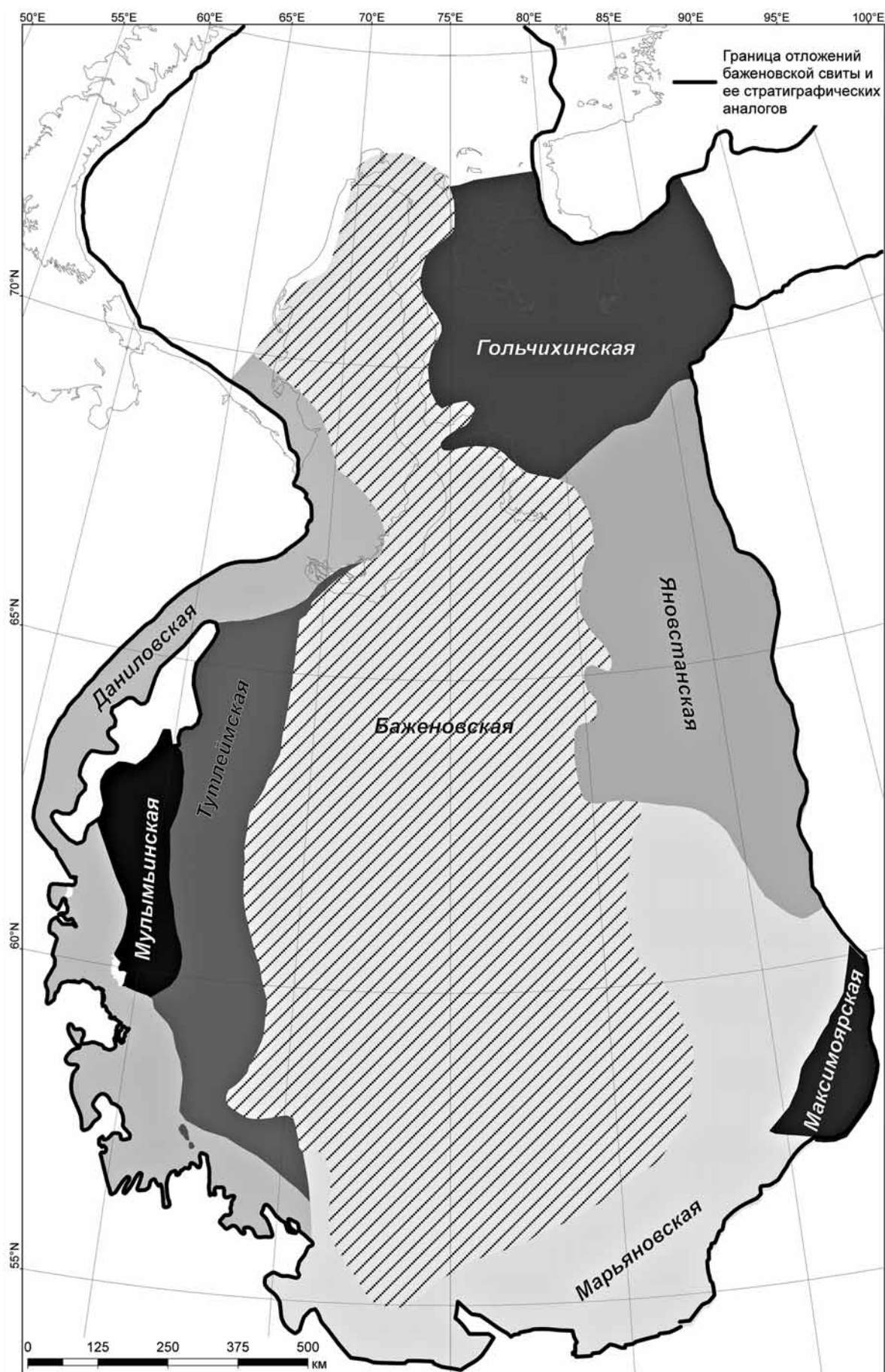


Рис. 2. Схема распространения свит, частично или полностью входящих в состав баженовского горизонта, по [Брадучану и др., 1986] с дополнениями

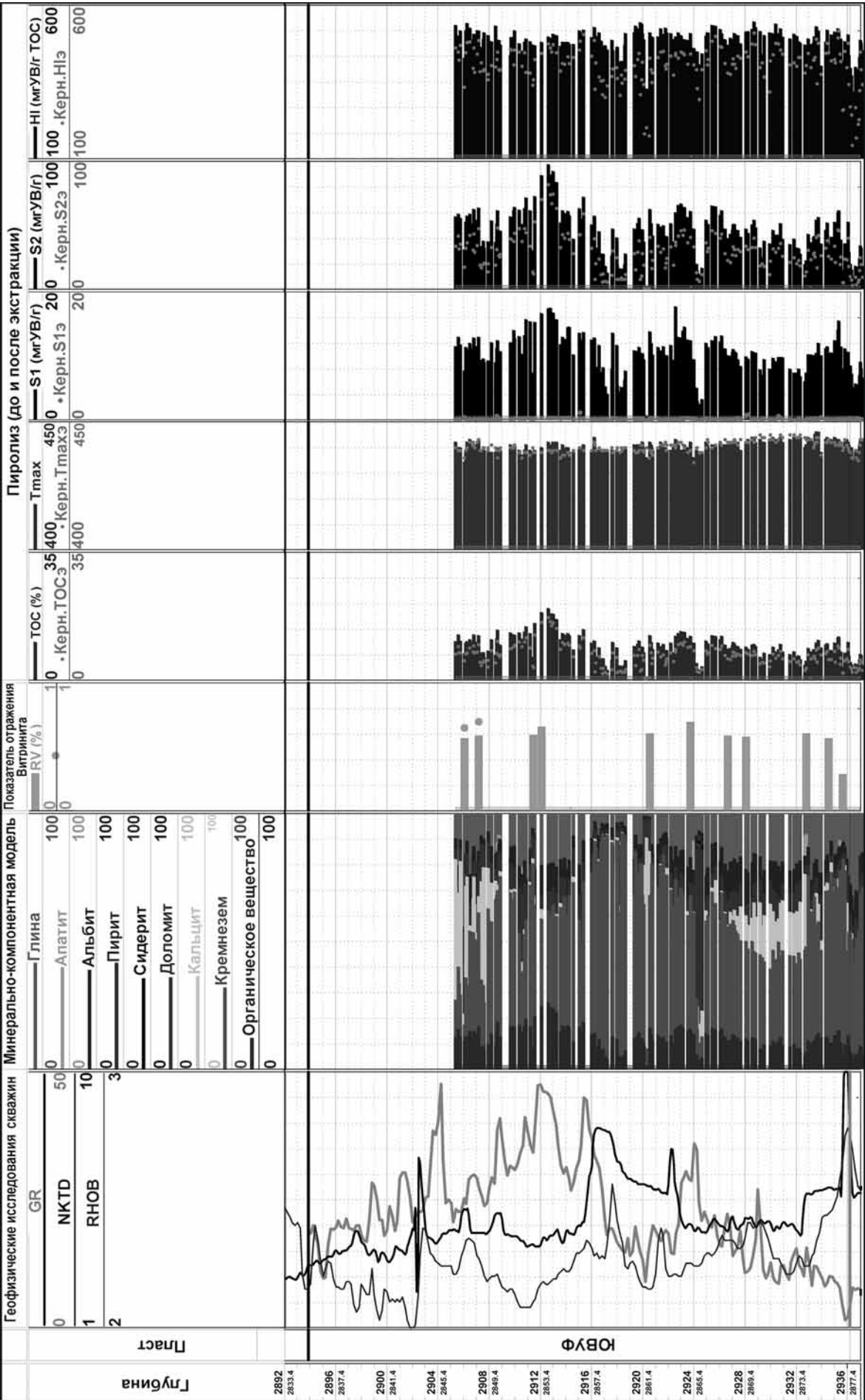


Рис. 3. Геолого-геофизический планшет с результатами пиролитических и углепетрографических исследований пород БВУФ

но-глинистых пород, обогащенных глауконитом и остатками ростров белемнитов, относимых к георгиевской или абалакской свитам (верхний оксфорд—нижний титон) [Захаров, 2006]. Перекрываются отложения БВУФ породами неокомского клиноформного комплекса, в составе которого выделяют ахскую, сортымскую и другие свиты [Атлас..., 2004]. Территория Западной Сибири на момент баженовского времени представляла собой морской бассейн, максимальная глубина которого по разным оценкам составляла 200–500 м, что подтверждается находками остатков макро- и микробиоты (рис. 1).

Морской бассейн заселяли в основном фито-зоопланктонные и нектонные организмы, представленные радиоляриями, которые обитали в приповерхностных водах, а бентосные организмы имели подчиненное значение. Остатки нектонных организмов в породах представлены раковинами аммонитов, рострами белемнитов, крючками (онихиты) палеокальмаров и скелетами рыб. Среди бентосных организмов преобладали бухии и иноцерамы, причем в подавляющем большинстве пород присутствуют остатки раковин или бухий, или иноцерам [Доманикиты..., 1982; Захаров, 2006; Панченко и др., 2015].

Формирование отложений происходило в наиболее удаленной от берега центральной впадине, где отлагались кремнистые илы, в различной степени глинистые, обогащенные ОВ. Осадконакопление характеризовалось небольшой скоростью (0,002–0,004 мм/год) в условиях стабильного седиментационного режима на протяжении 5–8 млн лет [Дорофеева и др., 1979]. Такие условия способствовали накоплению осадков относительно небольшой мощности (20–30 м) с большим количеством ОВ. На подводных равнинах, окружавших псевдоабиссальную впадину, откладывались осадки, сформировавшие тутлеимскую, мулымьинскую, марьяновскую, даниловскую, яновстанскую свиты (рис. 2). Входящие в состав баженовского горизонта тутлеимская и мулымьинская свиты характеризуются высоким содержанием ОВ. В отложениях марьяновской, даниловской, яновстанской свит содержание ОВ значительно меньше и присутствует не во всем объеме этих свит, а только в отдельных пропластках [Решение..., 2004]. Такая латеральная и вертикальная неоднородность БВУФ ставит перед исследователями задачу систематизации методов изучения ОВ как на локальном, так и на региональном уровне; кроме того, необходимо районировать и типизировать отложения.

Указанные условия определили формирование нефтематеринской толщи баженовской высокоуглеродистой формации. Однако, как упоминалось выше, на образование коллекторских интервалов сильно влияют вторичные процессы, к которым могут относиться, в частности, растворение и переотложение различных минералов, гидротер-

мальные процессы и процессы прогрева. Такие процессы могут приводить к существенным изменениям в строении ОВ вследствие его дозревания и перехода на высокие градации катагенеза [Васильев и др., 2015]. Учитывая, что такие явления локальны, необходимо проводить исследования на макроуровне для выяснения особенностей распространения ОВ в породах и их характеристик.

Методы исследования. Пиролиз образцов породы выполнялся на пиролизаторе Rock-Eval 6. В интервале температуры до 300 °C (пик S_1 ($S_0 + S_1$)) происходит десорбция свободных (C_1 – C_7) и сорбированных (C_8 – C_{33}) углеводородов (УВ), входящих в состав попутных газов и нефтей (УВ метанового ряда, ароматические УВ и др.). В интервале термического разложения керогена при 300–650 °C (пик S_2) происходит собственно пиролиз, в результате которого ОВ превращается в УВ. Третий пик (S_3), измеряемый детектором теплопроводности при 300–390 °C, фиксирует количество диоксида углерода. Продукты пиролиза, соответствующие вышеуказанным пикам, измеряются в мг/г породы. Температура, при которой отмечается наибольшая интенсивность выхода УВ в пределах пика S_2 , обозначается как T_{max} . Нефтегазоматеринский потенциал породы определяется суммой двух пиков ($S_1 + S_2$), он измеряется в кг УВ/т породы или мг УВ/г породы. Затем в печи окисления происходит программированный нагрев породы (300–850 °C) в атмосфере кислорода. Общее содержание углерода TOC (Total Organic Carbon) вычисляется с учетом того, что 83% в элементном составе УВ пиков S_1 , S_2 приходится на углерод.

Степень выработанности керогена отражается в коэффициенте PI (Production Index), он равен $S_1 / (S_1 + S_2)$, его значения, составляющие 0,1–0,4, отвечают условиям главной зоны нефтеобразования и, следовательно, могут служить относительной мерой катагенеза. Водородный индекс HI (Hydrogen Index) представляет собой отношение количества органических соединений S_2 на содержание органического углерода (TOC) в образце (мг УВ/кг TOC). Кислородный индекс OI (Oxygen Index) показывает количество CO_2 (пик S_3) относительно $C_{орг}$ (мг CO_2 /г TOC).

Экстракцию образцов проводили хлороформом в аппарате Сокслета. Процесс экстракции считается завершенным, когда концентрация битумоида в хлороформе составляла <0,000625%.

Для исследования ОВ в БВУФ выполнены углепетрографические исследования, анализ образцов методами растровой электронной микроскопии и растровой электронной микроскопии с фокусированным ионным пучком. Углепетрографические исследования проводились в лаборатории угля кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на установке QD1302 «Craic Technologies».

Исследования структуры порового пространства, взаиморасположения породообразующих минералов и состава образцов керна выполнены на кусках (сколах) и аншлифах 10 образцов с помощью растрового электронного микроскопа «JEOL 6610 LV», сопряженного с системой энергодисперсионного рентген-спектрометрического анализа «Oxford Instruments INCAxAct». Для специфической подготовки образца перед микроскопированием применялась система холодно-плазменной металлизации «JEOL JFC1600». Материал напыления — платина. Обработку результатов проводили при помощи программного обеспечения SEM Control User Interface, ver. 7.11 «Jeol Technics LTD». Эта методика исследования наиболее информативна, так как отражает полную информацию о структуре порового пространства. Изучение образцов с использованием фокусированного ионного пучка проводилось на растровом электронном микроскопе «Helios NANOLAB 6001».

Результаты исследований и их обсуждение. Геохимические характеристики баженовской свиты. Для оценки характеристик отложений БВУФ, выделения ее границ, определения нефтегенерационного потенциала, типа и зрелости ОВ проводят геохимические исследования образцов керна материала. На рис. 3 представлен пример геолого-геофизического планшета с результатами пиролитических и углепетрографических исследований. По коротажным признакам баженовская свита характеризуется большими значениями на кривой гамма-каротажа, высокими сопротивлением и значениями НІ, пониженными значениями плотностного каротажа. К основным характеристикам, по которым, в частности, выделяют нефтенасыщенные прослои, относятся параметры S_1 и S_2 , а также индекс продуктивности (PI). Повышенные значения параметра S_1 относительно параметра S_2 , также выражаемые через высокие значения PI, свидетельствуют о наличии свободной нефти в порах породы и могут быть идентификатором коллектора в БВУФ. Пиролитические параметры $T_{\max}$ и НІ, а также параметр R_o — величина коэффициента отражательной способности витринита, определяемая с помощью углепетрографических исследований, позволяют оценить зрелость ОВ, а также определить его тип.

Как видно на рис. 3, в исследованной скважине значения НІ изменяются по разрезу, особенно при измерениях после экстракции, которые исключают вклад в этот параметр адсорбированных УВ и гетероатомных соединений (ГАС), при этом параметр $T_{\max}$ остается практически неизменным. Также для образца на границе БВУФ и подстилающих отложений получено более низкое значение параметра R_o . Эти отличия свидетельствуют, что ОВ в пределах одного разреза может несколько отличаться по степени преобразованности (рис. 4). Несмотря на то что в нефтяных компаниях и на-

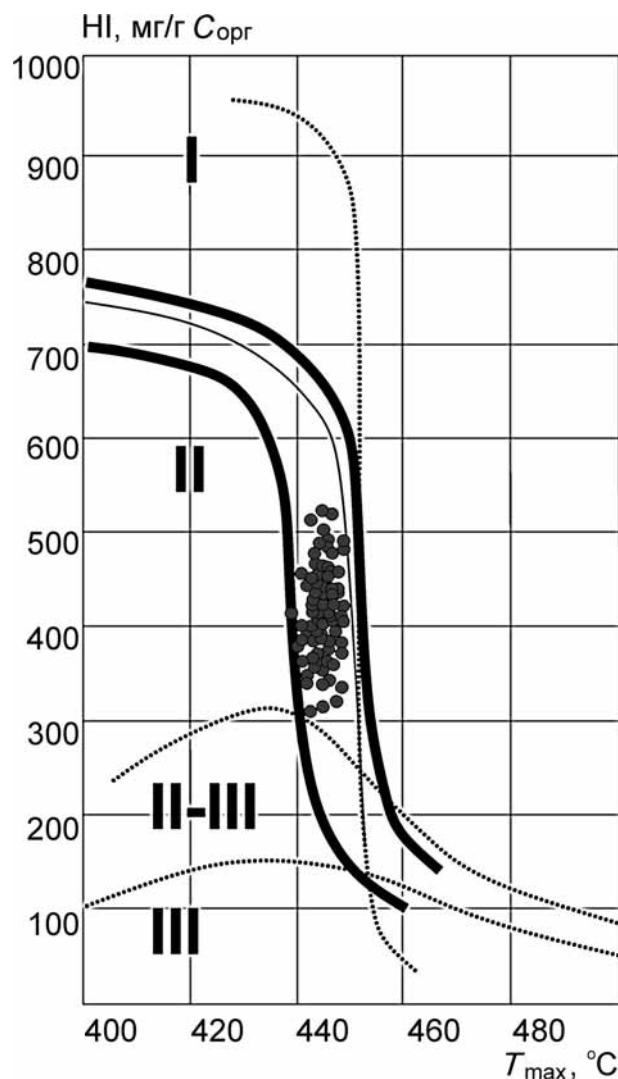


Рис. 4. Модифицированная диаграмма Ван-Кревелена

учно-исследовательских институтах для подсчета запасов определения характеристик БВУФ по территории и построения карт используют усредненные значения, необходимо провести более детальные исследования, которые позволят понять, насколько достоверно применение усредненных параметров, каковы особенности распределения органических компонентов (свободные и сорбированные УВ и ГАС, кероген), отличаются ли они по генетическим признакам и степени преобразованности.

Органическое вещество баженовской свиты. Органическое вещество — достаточно общий термин, включающий в себя все соединения в образце, состоящие преимущественно из углерода, водорода, кислорода, азота и серы. В то же время органические соединения существенно различаются не только по составу, но и по агрегатному состоянию (газообразные, жидкие и твердые) и степени свободы (свободные и физически связанные). Ранее было показано, что в БВУФ присутствует нефть в открытых, закрытых и запечатанных порах, а также физически связанные УВ, ГАС и кероген

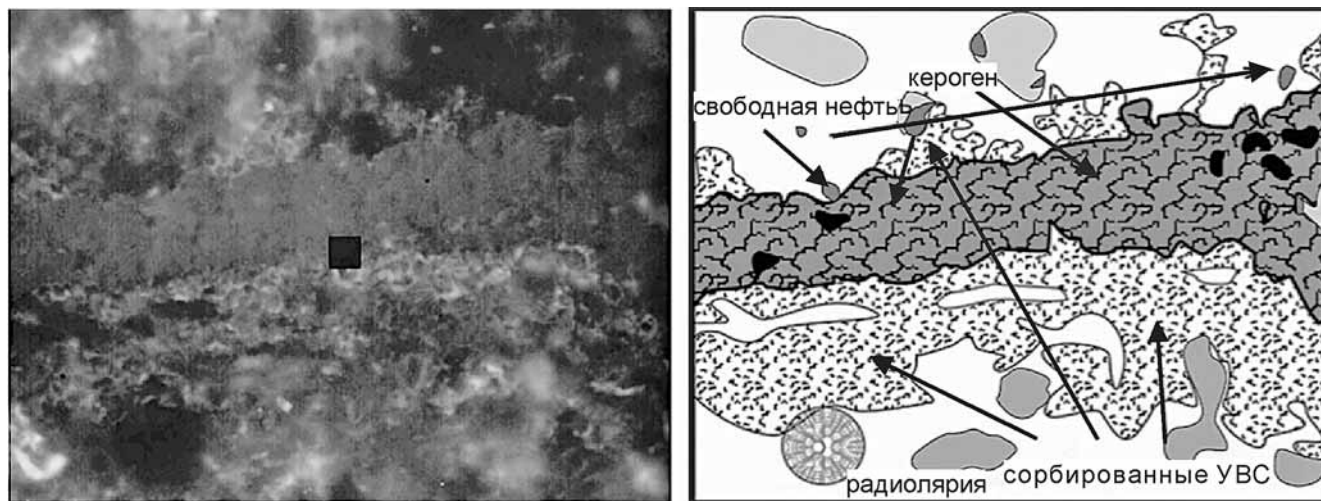


Рис. 5. Микрофото ОВ баженовской свиты под люминисцентным микроскопом с темно-бурым микропрослоем керогена, окруженным люминисцирующим сиенгитичным битумоидом (слева), а также схематичное соотношение нефти и сорбированных УВС в поровом пространстве пород (справа) (выполнено Н.В. Прониной)

[Калмыков, 2017]. При извлечении кернового материала из скважин за счет перепада давления происходит дегазация породы, в результате которой пузырьки газа вытесняют нефть из порового пространства. Поэтому при исследованиях пород основные изучаемые объекты — свободные УВ и ГАС в закрытых порах, связанные УВ и ГАС, а также кероген. При этом на микроуровне можно установить распределение битумоидов в объеме пород, определить зрелость конкретного твердого мацерала и его структуру.

В процессе углепетрографического изучения в составе исследованных образцов выделены следующие органические мацералы: битуминит (*bit*), битумы (*B*) и твердые битумы (*SB*), называемые также микринитом или остаточным ОВ. Все эти мацералы, по сути, — разные формы одного и того же вещества, проходящего трансформацию из исходного, твердого образования (*bit*) в жидкое (*B*) и оставшееся в твердой фазе, но значительно уменьшившееся в объеме остаточное ОВ (*SB*). Все три мацерала, присутствующие в образцах изученной коллекции согласно последней классификации органических мацералов [Pickel et al., 2017] можно отнести к группе липтинита.

Битуминит, первоначально образующийся из водорослей, встречается в виде комочков, линз и даже слойков разного размера и формы. Поскольку исходная водорослевая структура теряется очень рано, битуминит чаще всего характеризуется в дневном свете как аморфное ОВ серого цвета. Когда начинается генерация жидких УВ из битуминита появляется вторичная пористость внутри битуминитовых сгустков, их края приобретают неровный, кружевной контур. Одновременно наблюдается появление битумных оторочек вокруг битуминита, такие же битумы могут находиться внутри вторичных пор. Проникшие в минеральные окружающие породы битумы окрашивают их в

коричневый цвет; *SB* — твердая, обуглероженная часть ОВ после генерации жидких УВ, обычно *SB* очень небольшого размера.

Наблюдаемое состояние ОВ в исследованных образцах, их совместное нахождение служат прямыми признаками главной фазы нефтеобразования. Отметим тот факт, что состояние ОВ отражается в таких оптических свойствах, как показатель отражения битуминита (BR_o , %) и люминесцентное свечение. В БВУФ при отсутствии гумусовых мацералов были выполнены замеры показателя отражения по битуминитам, которые можно считать эквивалентами витринита. Для пересчета использована следующая формула [Liu, Shi, 1994]:

$$R_o = 0,668 \cdot BR_o + 0,346.$$

Характерный пример распространения органического вещества в породе приведен на рис. 5.

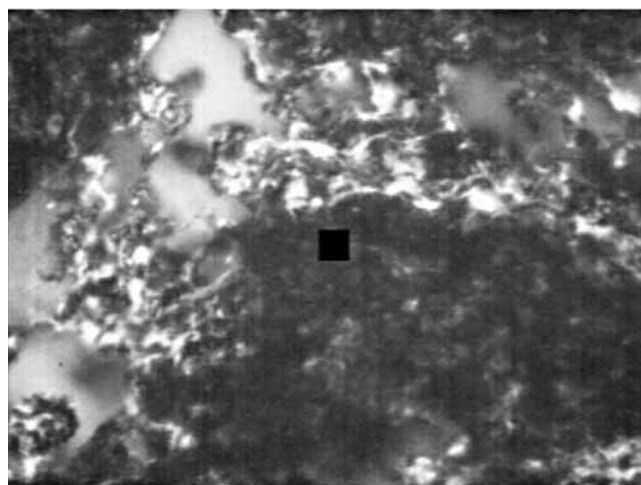


Рис. 6. Фото образца А породы баженовской свиты с равномерным распределением УВ и ГАС в матрице, сделанное при помощи конфокальной микроскопии (размер черного квадрата 5 мкм)

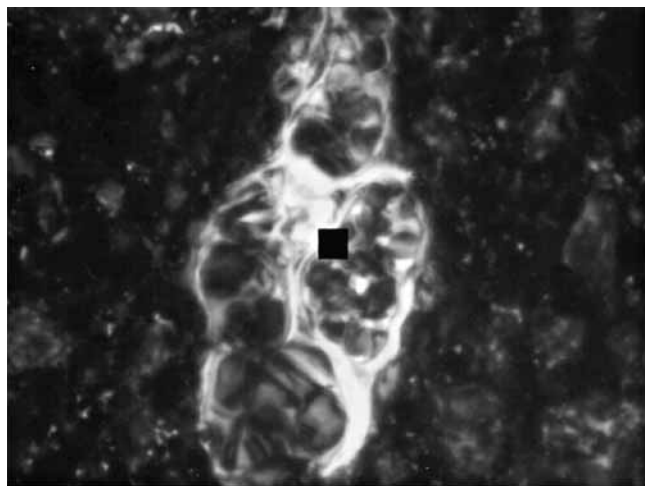


Рис. 7. Фото образца Б породы баженовской свиты со скоплением УВ и ГАС в структуре, предположительно в поре, сделанное при помощи конфокальной микроскопии (размер черного квадрата 5 мкм)

Как видно на рис. 5, в породах может присутствовать как кероген, представленный темным веществом в центре фотографии, так и отделившиеся от него сорбированные УВ и ГАС, которые в данном случае расположены в породе вокруг керогена, однако не покрывают его, что свидетельствует об окончании процесса выделения УВС из керогена, а также свободная нефть в порах.

Информация о расположении свободных и сорбированных УВ и ГАС в породе необходима для понимания строения породы, характеристики ее порового пространства, изучения возможных путей миграции УВ по разрезу, а с технологической точки зрения она может помочь оценить эффективность применения вторичных методов воздействия, связанных с использованием органических и неорганических растворителей и технологии гидроразрыва пласта. На рис. 6 и 7 представлены изображения образцов А и Б пород БВУФ из разных интервалов, которые отличаются составом и строением и получены методом люминисцентной

микроскопии. Как видно на рис. 6, яркое свечение, характерное для ОВ, показывает относительно равномерное его распределение в матрице породы. На рис. 7 видно, что ОВ приурочено к определенной структуре, предположительно к поре, образованной в результате растворения скелета радиоларии. Важно отметить, что в рассматриваемом случае в основном матриксе породы не встречаются УВ и ГАС. В результате сравнения образцов выявлено различие как в пористой структуре породы (образец А имеет пористую структуру, заполненную УВ и ГАС, в то время как поры образца Б единичны и не связаны между собой), так и в положении органических соединений в образце. С точки зрения разработки такие результаты показывают, что образец Б перспективнее разрабатывать, используя технологию гидроразрыва пласта, в то время как образец А эффективнее подвергать воздействию растворителей. При этом пиролитические характеристики образцов, особенно параметр S_1 , будут похожи (в среднем 3,47 мг УВ/г породы до экстракции и 0,2 мг УВ/г породы после экстракции).

Помимо указанных вариантов распространения УВ и ГАС, в объеме возможен вариант, когда в процессе преобразования керогена формируются УВ соединения, которые не могут переместиться в объем образца в связи с отсутствием связанной пористой структуры в породе, а также вследствие сорбционных свойств керогена. В таком случае УВ соединения покрывают кероген, заполняя все адсорбционные центры (рис. 8). В дальнейшем в процессе генерации формируются УВ и ГАС, которые не могут адсорбироваться на поверхности и перераспределяются в ближайшем пространстве матрицы. Таким образом, в образце в битуминитах отчетливо видны зональность свечения и связь материнского мацерала с окружающими его битумными пленками. На рис. 8 видно, что содержание ОВ превышает 50% и представлено *B+bit*. Вся порода окрашена в коричневый цвет за счет *B*-пленок, *bit* образует линзы и комочки.

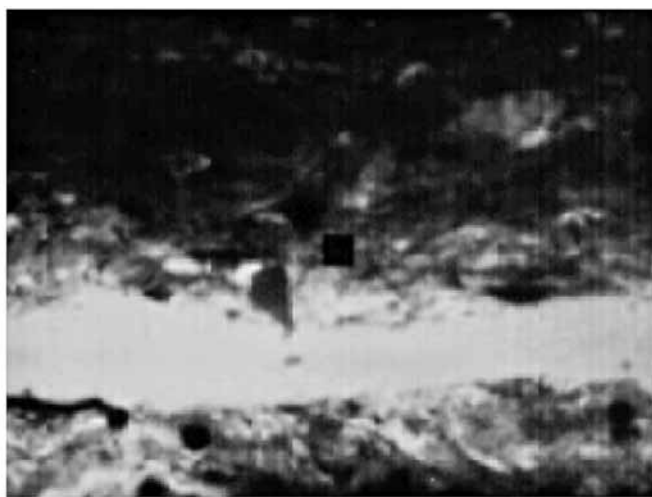
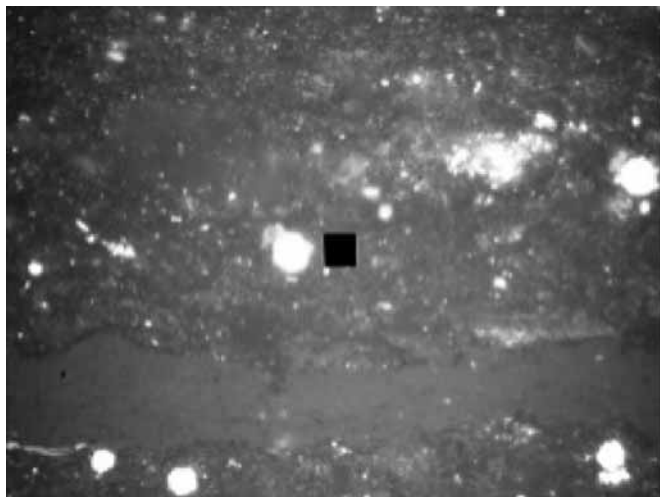


Рис. 8. Фото шлифов образца баженовской свиты в дневном (слева) и ультрафиолетовом (справа) свете (размер черного квадрата 5 мкм)

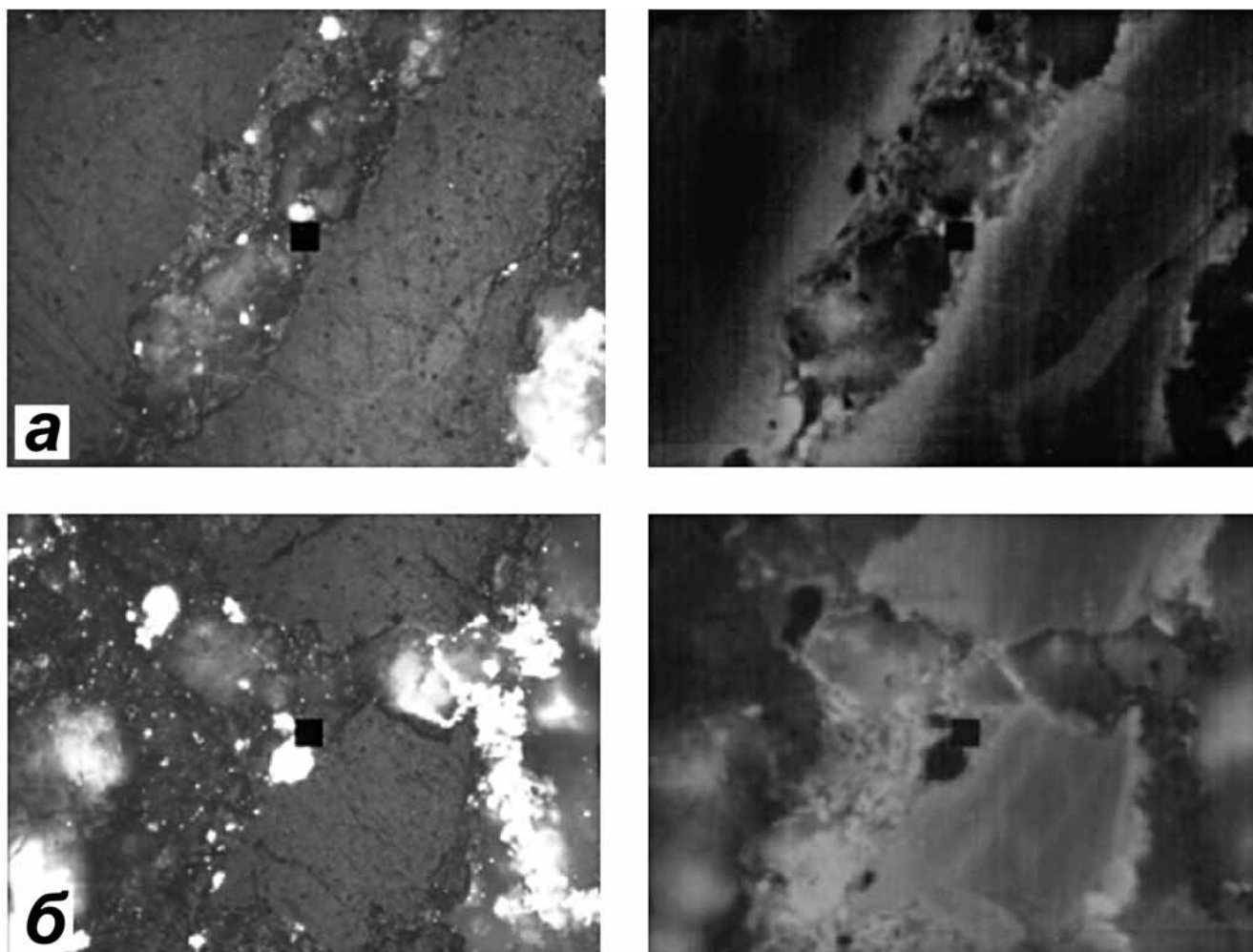


Рис. 9. Фото аншлифов образца баженовской свиты (участки а и б имеют разную генетическую преобразованность) в дневном и ультрафиолетовом свете (размер черного квадрата 5 мкм)

Отчетливо видны и «остаточные» включения ОВ (SB) — мелкие светло-серые вкрапления в минеральном веществе. Такие УВ и ГАС нельзя извлечь без применения органических растворителей или теплового воздействия на породу.

Детальные углепетрографические исследования позволили не только оценить распределение УВ и ГАС в объеме образца и его возможную приуроченность к крупным порам или керогену, но и выявить в породах БВУФ в рамках одного образца разную степень зрелости ОВ. Как видно на рис. 9, в одном образце встречен как мацерал, на поверхности которого отсутствуют сгенерированные УВС, которые распределены в образце вокруг керогена, что свидетельствует о повышенной зрелости ОВ, так и мацерал, полностью покрытый сгенерированными и сорбированными УВС. В результате можно сделать вывод, что в рамках одного образца встречается ОВ с разной степенью преобразованности, что свидетельствует, вероятно, о разном составе и характеристиках исходного ОВ. Возможно, разница обусловлена растительным и животным происхождением ОВ в образце.

Полученные значения R_0 были сопоставлены с результатами пиролиза, в частности с значением

параметра НІ. На рис. 10 представлена зависимость остаточного генерационного потенциала породы, характеризуемого параметром НІ, от показателя R_0 . Светлым цветом выделены породы с разными показателями отражения витринита в одном образце. Как видно на рис. 10, нет точной зависимости между указанными параметрами. Можно предположить, что в исследованных разными методами образцах отличается соотношение ОВ разного состояния. Это обуславливает отклонения от общего среднестатистического значения НІ по разрезу (значения НІ исследованных нами образцов варьируют от 70 до 760 мг УВ/кг ТОС). Полученные результаты необходимо использовать для корректировки оценки зрелости ОВ и выявления формы распределения УВ и ГАС в породе.

Различие в происхождении и зрелости керогена в одном образце может быть доказано с помощью растровой электронной микроскопии. На рис. 11 показано наличие непористого керогена и керогена с развитой пористостью в одном образце. Учитывая, что прослой один и тот же, а вторичные процессы в таком случае должны затрагивать все ОВ, можно сделать вывод о разном происхождении ОВ в пределах одного образца. Исследование

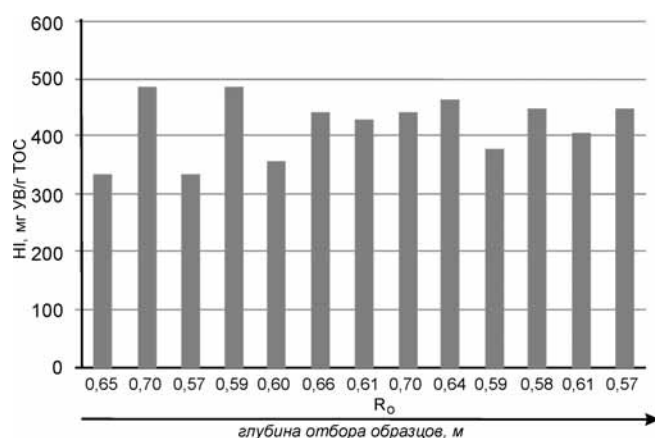


Рис. 10. Зависимость генерационного потенциала образца породы БВУФ от показателя отражения витринита R_0

такого образца пиролитическим методом приведет к некорректным результатам — ту часть ОВ, которая обладает развитой поровой структурой, не удастся обнаружить только по данным пироллиза, коллекторские свойства также могут быть оценены с погрешностью.

Для подтверждения предположения, что керогеновая пористость может быть пропущена, был исследован образец породы БВУФ с ОВ на стадии катагенеза МК2 с помощью растрового электронного микроскопа с фокусированным ионным пучком. Микрофотографии срезов приведены на рис. 12. Как видно на микрофотографии, в образце есть органическое вещество, практически не обладающее пористостью, в результате созревания которого образуются трещины и пустоты между керогеном и минеральной матрицей, а также органическое вещество с развитой керогеновой пористостью. Скорее всего, такое различие подтверждает разную природу керогена. При этом

полученные данные могут быть учтены при интерпретации результатов пироллиза образцов пород БВУФ, а методология рекомендована для проверки результатов, полученных общепринятыми методами исследования.

Представительным методом оценки порового пространства, взаиморасположения породообразующих минералов и ОВ и является растровая электронная микроскопия (SEM). На рис. 12 представлено FIB-SEM изображение аншлифа образца породы БВУФ. Такой метод подразумевает послойную резку образца, специально подготовленного для электронно-микроскопического исследования, посредством фокусированного ионного пучка. Отметим, что выявлено несколько зон с наличием ОВ, в одной из которых присутствует относительно равномерная пористость, а в другой — поровое пространство приурочено к границе с минеральной матрицей. Такие различия в структуре вещества в одном микрообразце явно свидетельствуют о различиях вещественного состава керогена.

Закключение. В настоящее время исследователи баженовской высокоуглеродистой формации не приняли единую геологическую модель строения отложений, что приводит к постановке ряда задач по ее изучению, среди которых одна из важнейших — изучение органического вещества. Нами представлены данные о наличии в отложениях БВУФ органического вещества разной степени преобразованности и в разных пространственных взаимоотношениях. Одним из решений поставленной проблемы может быть переход исследований на микроуровень. При наличии точных представлений о структуре порового пространства и состоянии ОВ возможна дальнейшая интеграция данных для принятия правильной модели строения

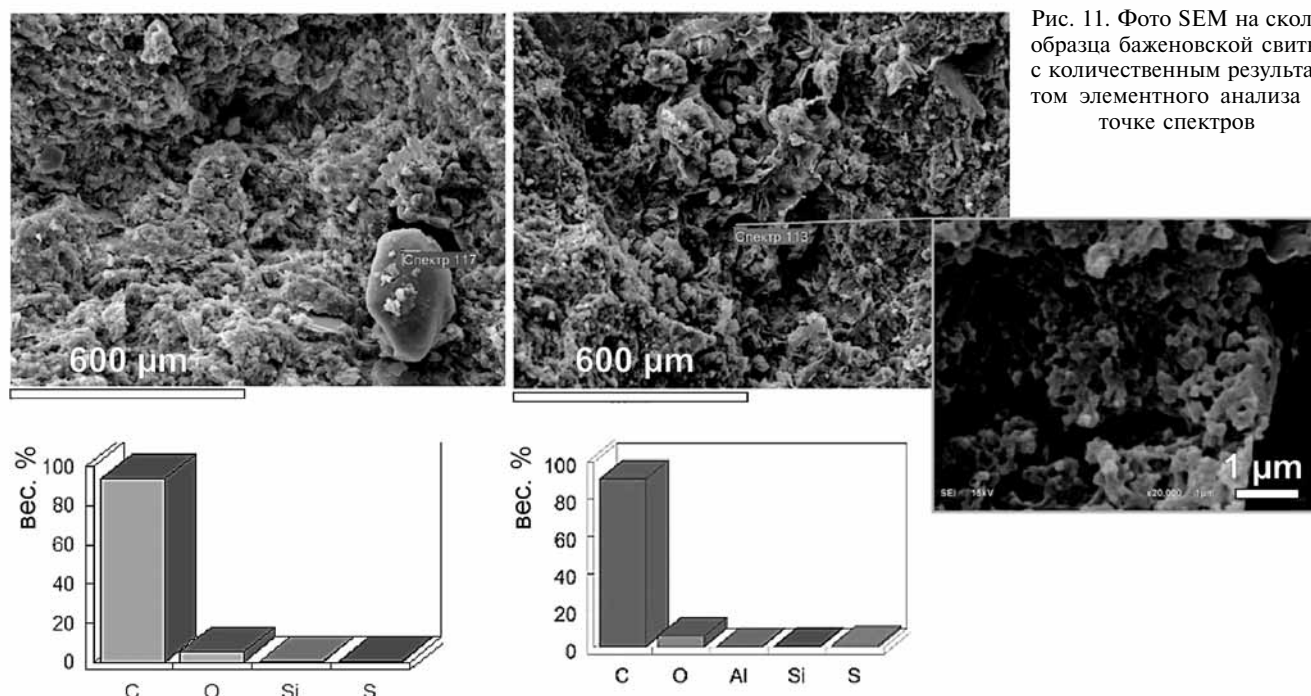


Рис. 11. Фото SEM на сколе образца баженовской свиты с количественным результатом элементного анализа в точке спектров

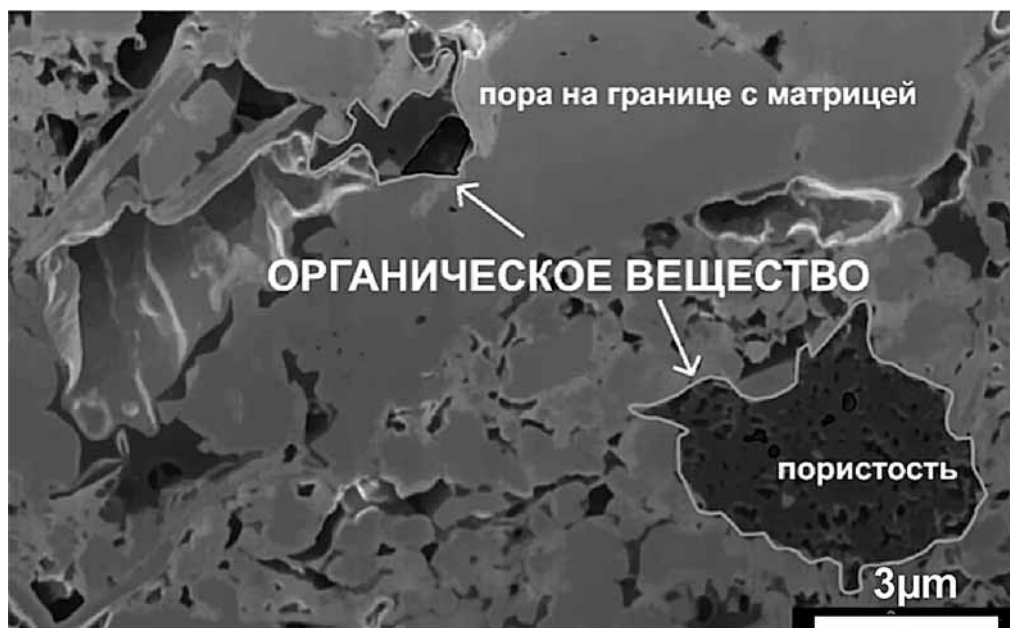


Рис. 12. FIB-SEM изображение образца породы баженовской свиты

отложений высокоуглеродистой формации. Данные исследований, представленных в статье, могут служить началом масштабного исследования, по-

звляющего выявлять, изучать и прогнозировать преобразованность как каждого породообразующего компонента отдельно, так и минерально-компонентной ассоциации пород БВУФ, а также определять некоторые поисковые критерии формирования нетрадиционных коллекторов в нефтематеринских толщах.

В дальнейшем необ-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас «Геология и нефтегазоносность Ханты-мансийского автономного округа» // Государственное предприятие ХМАО «НАЦРН имени В.И. Шпилемана». Ханты-Мансийск, 2004.

Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа / Под ред. Б.А. Соколова: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 384 с.

Баталин О.Ю., Вафина Н.Г. Формы захвата свободных углеводородов керогеном // Междунар. журн. Прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10. С. 418–425.

Брадучан Ю.В., Гурари Ф.Г., Захаров В.А. и др., Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность). Новосибирск: Наука, 1986. 216 с.

Брехуницев А.М., Нестеров И.И. Нефть битуминозных глинистых, кремнисто-глинистых и карбонатно-кремнисто-глинистых пород // Вестн. ЦКР Роснедра. 2010. № 6. С. 3–16.

Васильев А.Л., Пичкур Е.Б., Михуткин А.А. и др. Исследования морфологии пустотного пространства керогена баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 28–31.

Доманикиты Сибири и их роль в нефтегазоносности / Под ред. Ф.Г. Гурари. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1982.

Дорофеева Т.В., Лебедев Б.А., Петрова Т.В. Особенности формирования коллекторских свойств баженовской свиты Салымского месторождения // Геология нефти и газа. 1979. № 9. С. 20–23.

Захаров В.А. Условия формирования волжско-бериасской высокоуглеродистой баженовской свиты Западной Сибири по данным палеоэкологии // Эволюция биосферы и биоразнообразия: Сб. к 70-летию А.Ю. Розанова М.: Тов-во науч. изданий КМК, 2006. С. 552–568.

Калмыков Г.А. Строение баженовского нефтеносного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности: Автореф. докт. дисс. М., 2016.

Калмыков Г.А., Балушкина Н.С. Модель нефтенасыщенности порового пространства пород баженовской свиты Западной Сибири и ее использование для оценки ресурсного потенциала. М.: ГЕОС, 2017. 246 с.

Козлова Е.В., Калмыков Г.А., Ганичев Д.И., Балушкина Н.С. Формы нахождения углеводородов в породах баженовской свиты // Геофизика. 2015. № 3. С. 15–22.

Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В. и др. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 8. С. 972–1012.

Панченко И.В., Балушкина Н.С., Барабошкин Е.Ю. и др. Комплексы палеобиоты в абалакско-баженовских отложениях центральной части Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2015. Т. 10, № 2. С. 1–29.

Решение 6-го Межвед. стратигр. совещ. по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири (Новосибирск, 2003 г.). Новосибирск: СНИИГГиМС, 2004. 114 с.

Lui D.H., Shi J.C. Evaluation of early Paleozoic carbonate source rocks // Natural Gas Industry. 1994. Vol. 14. N 6. P. 32–36.

Pickel W., Kus J., Flores D. et al. ICCP. Classification of Liptinite — ICCP System 1994 // Internat. J. Coal Geology. 2017. Vol. 169. P. 40–61.

Поступила в редакцию

Поступила с доработки

Принята к публикации