

УДК 551.351

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОЛИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ КЕМБРО-ОРДОВИКСКИХ ПЕСЧАНИКОВ СЕВЕРО-ЗАПАДА РУССКОЙ ПЛАТФОРМЫ

© 2011 г. Г. Берто (Guy Berthault), А. В. Лаломов*, М. А. Тугарова**

28 boulevard Thiers, 78250 Meulan, Франция;

E-mail: berthault.guy@orange.fr

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)

119017 Москва, Старомонетный пер. 35;

E-mail: lalomov@mail.ru

**Санкт-Петербургский государственный университет

198904 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9;

E-mail: tugarova@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2009 г.

Анализ палеогидродинамических характеристик среды осадконакопления позволил реконструировать условия образования толщи кембро-ордовикских песчаников (КОП) Ленинградской области. Проведенная реконструкция палеолитодинамических параметров показала, что реальное время формирования этой толщи (продолжительность седиментации) значительно меньше соотносимого с ней интервала стратиграфической шкалы. Такая ситуация встречается и в других осадочных формациях. Определение реальной скорости образования отложений может повлиять на прогнозную оценку минеральных ресурсов осадочного бассейна.

Литодинамические процессы являются одним из наиболее важных факторов при формировании терригенных осадочных толщ, поэтому исследование палеолитодинамики позволяет устанавливать условия образования обломочных отложений. Особый интерес представляет оценка количественных параметров палеолитодинамических процессов. Такую возможность дают нам современные исследования в области гидротехники, гидродинамики и инженерной геологии, которые выявляют связи между гидродинамическими характеристиками среды осадконакопления, параметрами потока твердых наносов и текстурно-структурными характеристиками образуемых отложений. Установленные закономерности (с учетом поправок на решение обратной задачи) применяются для реконструкции параметров литодинамических процессов палеобассейнов.

Для решения поставленной задачи исследование проводилось в несколько этапов:

1. По гранулометрическому составу и текстурным особенностям отложений были реконструированы гидродинамические параметры среды осадконакопления. Соотношения скоростей потока (размывающей скорости и начальной скорости выпадения осадков данной размерности) с гранулометрическими характеристиками осадков установлены в результате экспериментальных и натурных наблюдений [Hjulstrom, 1935, Гришин,

1982]. При палеолитодинамических реконструкциях надо учитывать, что в образованных осадках фиксируется минимальная величина скорости потока в момент выпадения переносимого обломочного материала в придонном слое. Несомненно, что в фазе устойчивой транспортировки материала (а тем более, в фазе эрозии) скорость потока была больше той, которая существовала при образовании очередного осадочного слоя. Поскольку установить величину этого превышения с достаточной степенью достоверности в большинстве случаев не представляется возможным, получаемая при расчетах величина скорости потока является минимальной.

2. Имея расчетные значения скорости палеопотока в исследуемой фациальной зоне, зная зависимости потока твердых наносов от гидродинамических характеристик среды и учитывая гранулометрический состав отложений можно оценить емкость потока наносов¹. Здесь надо принимать во внимание, что такие зависимости чаще всего носят эмпирический характер, и каждая из них

¹ Под емкостью потока наносов понимается максимальное количество материала, способное перемешаться в единицу времени во вдольбереговом потоке наносов. Мощность потока наносов характеризует реальный расход наносов. Для насыщенных потоков в условиях обеспеченности потока рыхлым материалом, емкость и мощность потока совпадают [Морская ..., 1980].

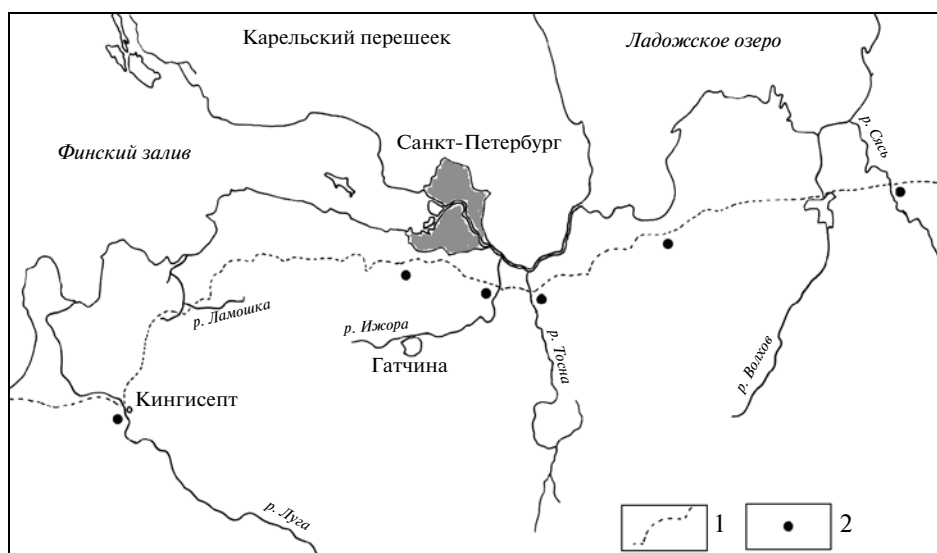


Рис. 1. Схема района работ.

1 — Балтийско-Ладожский глинт; 2 — расположение опорных разрезов.

имеет свою область применения. Так, к примеру, уравнение Шези дает наиболее достоверные результаты для глубоких потоков с относительно мелким материалом, когда отношение глубины потока к диаметру частиц стремится к бесконечности [Julien, 1995]; уравнение Багнольда [Bagnold, 1956] применимо для полностью турбулентной среды при больших мощностях потоков и т.д. Правильность выбора метода для реконструкции литодинамических параметров конкретной зоны исследуемого палеобассейна во многом определяет точность получаемых результатов.

3. Зная геометрические параметры исследуемой свиты (протяженность в двух взаимно перпендикулярных направлениях и среднюю мощность), имея оценку емкости потока наносов в пределах этой палеофациальной зоны и учитывая частичный эрозионный срез данного комплекса отложений, а также устойчивость направления палеопотока, можно оценить реальное время осадконакопления данной свиты, используя модель “заполнения резервуара” (reservoir sedimentation) [Julien, 1995].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Литодинамическая реконструкция проводилась для песчаной части разреза кембро-ордовикской толщи Ленинградской области. Первые геологические данные по этому разрезу были получены еще в XIX веке. Стратиграфические, палеонтологические, литологические результаты более поздних исследований [Рухин, 1939; Ульст, 1959 и др.] и опубликованные в последнее время [Геология ..., 1991; Попов и др., 1989; Дронов, Федоров, 1995 и др.] позволили существенно детализировать ли-

тостратиграфическое расчленение разреза, но это относится, преимущественно, к его ордовикской глинисто-карбонатной части. Песчаная часть кембро-ордовикской толщи по-прежнему остается сложным объектом для стратиграфов и плохо разделяется на отдельные слои, которые можно было бы проследивать от обнажения к обнажению.

Полевые работы по изучению терригенных кембрийских и ордовикских отложений Ленинградской области проводились на разрезах, считающихся опорными для данного региона. Основное внимание было уделено обнажениям долин рек Тосны и Саблинки, где полностью вскрывается терригенная песчаная толща, залегающая между “синими глинами” нижнего кембрия и чёрными сланцами пакерротского горизонта нижнего ордовика. Также был изучен ряд обнажений долин рек Ижоры, Волхова и Сясь (рис. 1).

В тектоническом отношении исследуемая толща расположена на северо-западной периферии Московской синеклизы, заложившейся в конце протерозоя, где преобладали эпейрогенические движения, определившие ее регрессивно-трансгрессивный характер [Гейслер, 1956]. В раннем палеозое в пределах северо-запада Русской платформы существовал мелководный морской бассейн с высокой гидродинамической активностью, северная граница которого определялась положением Балтийского щита, который служил источником поступления материала в область седиментации. Непосредственно в составе Балтийского щита кор выветривания не установлено, но минералогическая зрелость обломочного материала, поступавшего в бассейн осадконакопления

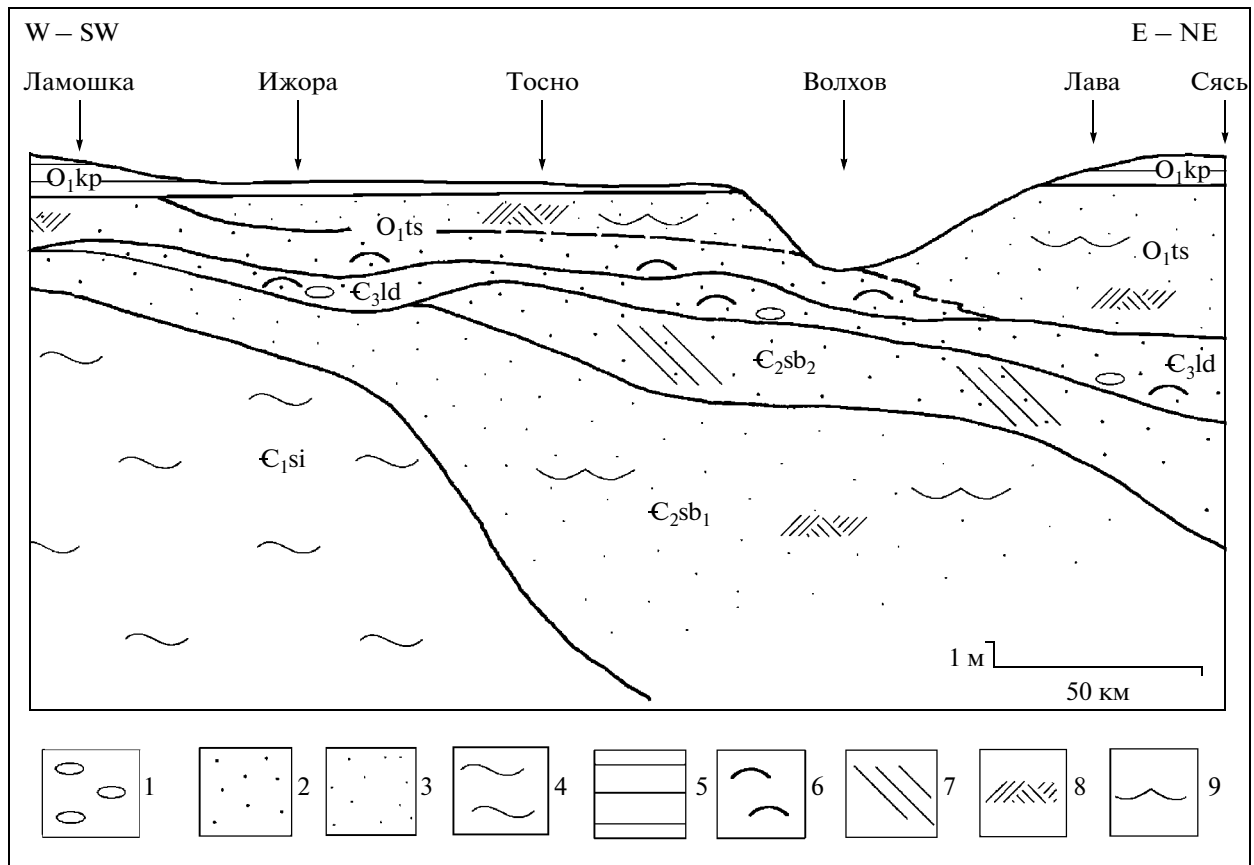


Рис. 2. Разрез кембро-ордовикских песчаников Ленинградской области.

1 – галька; 2 – крупно-среднезернистые пески; 3 – тонкозернистые пески; 4 – глины; 5 – глинистые сланцы; 6 – раковинный детрит; 7 – однонаправленные косослоистые серии; 8 – перекрестная косая слоистость; 9 – знаки ряби.
Sb₁ – Саблинская свита, нижняя подсвита; Sb₂ – Саблинская свита, верхняя подсвита; Ld – Ладожская свита; Ts – Тосненская свита.

(содержание неустойчивых к выветриванию минералов в тяжелой фракции КОП не превышает 10–15%), свидетельствует о глубоком химическом выветривании пород в области сноса [Гурвич, 1978].

В строении толщи снизу вверх по разрезу выделяются три свиты (рис. 2).

Саблинская свита среднего кембрия (C₂sb). Классические обнажения свиты находятся в долине реки Тосна близ пос. Ульяновка. Саблинская свита сложена светло-серыми, розоватыми и желтоватыми, иногда ожеженными, хорошо сортированными мелкозернистыми кварцевыми слабосцементированными песчаниками с прослоями пластичных коричневатых глил толщиной 0,5–1 см.

Саблинская свита подразделяется на две подсвиты, сходные по литологическому составу, но различающиеся по характеру текстур: в нижней подсвите преобладают горизонтально-параллельно-слоистые текстуры со знаками ряби и мелкой перекрестной косой слоистостью; для

верхней подсвиты характерны однонаправленные косослоистые текстуры. Подробный текстурный анализ толщи КОП будет проведен в следующем разделе.

Свита распространена по всей Ленинградской области к востоку от р. Луга и залегает с размывом на “синих глинах” нижнего кембрия. Граница размыва относительно ровная, врезы широкие, с пологими бортами, амплитуда палеорельефа достигает нескольких метров. С запада на восток мощность Саблинской свиты увеличивается от 2–3 м до 10–13 м.

Ладожская свита (C₃ld) залегает с размывом на саблинских песчаниках. Она представлена желтовато-серыми средне и мелкозернистыми хорошо сортированными кварцевыми и кварц-полевошпатовыми слабосцементированными песчаниками с раковинами лингулат, линзами и изометричными пятнами, обогащенными оксидами железа.

Нижняя граница свиты носит явно выраженный эрозионный характер, в пределах отдельных



Рис. 3. Знаки ряби в отложениях Саблинской свиты.

обнажений прослеживаются эрозионные врезы подошвы ладожской свиты шириною до 5–10 м и глубиной до 1 м. Во врезях эрозионного палеорельефа на границе присутствуют базальные галечники состоящие из глинистых окатышей коричневато-серых глин, встречающихся в отложениях нижележащей саблинской свиты. В нижней части свиты крупность песков увеличивается до среднезернистых, встречаются косослоистые текстуры и знаки ряби. Выше по разрезу расположены массивные либо горизонтально-слоистые мелкозернистые песчаники с глинистыми прослоями толщиной до 0,5–1 см.

Отложения ладожской свиты характеризуются небольшой мощностью: в западной части Ленинградской области до 1–1,2 м, в восточной – до 3 м.

Тосненская свита (O_{1ts}) имеет почти повсеместное распространение в Ленинградской области. Залегает с размывом на песчаниках ладожской свиты, согласно перекрывается копорской свитой, представленной черными аргиллитами того же возраста. Сложена крупно-среднезернистыми, преимущественно кварцевыми слабосцементированными песчаниками, в которых содержатся створки беззамковых брахиопод и детритовый материал. Для пород свиты характерны троговая и косая слоистость. Мощность свиты варьирует от 2 до 5 м.

ТЕКСТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОРОД КЕМБРО-ОРДОВИКСКОЙ ПЕСЧАНОЙ ТОЛЩИ И ФАЦИАЛЬНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Песчаные породы кембрия и ордовика Ленинградской области обладают интересными и важными для понимания формирования толщи седиментационными текстурами – это, в первую очередь, различные типы слоистости и знаки ряби, а также характер межпластовых и внутривластовых эрозионных поверхностей. При исследова-

нии текстур основное внимание уделялось форме и пространственному расположению слоевых швов и слоев внутри слоистых серий (при возможности в двух перпендикулярных сечениях), протяженности и мощности серий, производились замеры азимутов и углов падения слоев. По результатам замеров косой слоистости были составлены розы-диаграммы для каждого из выделенных возрастных подразделений: на диаграммах откладывался процент встречаемости косослоистых серий данного направления. Терминология и классификация слоистых текстур и знаков ряби даются по работе В.Н. Шванова [1987].

Саблинская свита, нижняя подсвита (C_2sb_1). В подошве подсвиты выделяются горизонтально-слоистые текстуры, выше по разрезу сменяющиеся косой слоистостью. В целом для подсвиты характерна плоскостная параллельная разнонаправленная косая слоистость. В верхней части подсвиты обнаружены поверхности со знаками ряби, высота валиков составляет 3,5–4,5 см, расстояние между ними – 20 см (рис. 3).

Азимуты падения косых слоев по результатам многочисленных замеров для пород, вскрывающихся в долинах рек Тосна и Лава, имеют два диаметрально противоположных направления: запад–северо-запад и восток–юго-восток (рис. 4а).

Полученные данные позволяют определить генетический тип текстур. Прямолинейность и, как правило, параллельность серийных швов, форма слоев, рисунок слоистости в перпендикулярных сечениях, узкие лучи роз-диаграмм определенно указывают на образование данных текстур в результате перемещения прямолинейных поперечных песчаных гряд, возникающих под воздействием придонных течений. При этом наклонные слоевые швы свидетельствуют о миграции гряд в условиях пульсационного поступления материала [Кутырев, 1968], а наличие симметричных знаков ряби, образующихся в зоне волнового воздействия, о мелководном характере бассейна [Фролов, 1992].

Наличие в нижней части подсвиты горизонтально-слоистых текстур позволяет предположить, что эта часть разреза отлагалась в относительно мелководных условиях ниже зоны волнового воздействия при отсутствии придонных течений за счет выпадения осадков из взвеси, поступающей из более мелководных прилегающих областей шельфа. В период отложения верхней части подсвиты обстановка осадконакопления меняется: наличие серий косой слоистости с диаметрально противоположными направлениями падения косых слоев и знаков ряби свидетельствует о том, что формирование данных текстур происходило в мелководных гидродинамически активных морских условиях в зоне

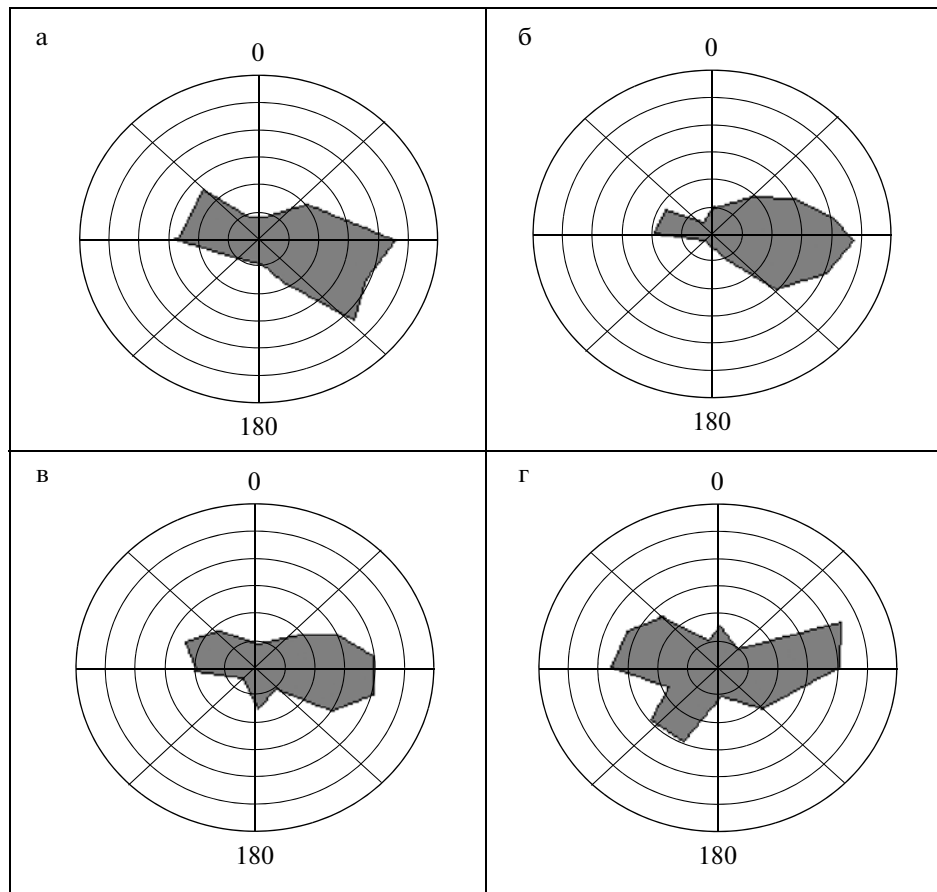


Рис. 4. Розы-диаграммы направлений косої слоистости в толще кембро-ордовикских песчаников Ленинградской области: а – Саблинская свита, нижняя подсвита; б – Саблинская свита, верхняя подсвита; в – Ладожская свита; г – Тосненская свита.

волнового воздействия при наличии периодических придонных, вероятнее всего, приливно-отливных течений. Каждый цикл прилива или отлива формировал свою систему гряд, которая разрушала частично или полностью предыдущие, захоранивая их в виде косої серий. Хотя взаимоотношение направления потока и падения косо-слоистых серий далеко не однозначное [Кутырев, 1968], можно считать, что роза-диаграмма косої слоистости в первом приближении отражает перемещение обломочного материала палеобассейна. Для исследуемой толщи при наличии двух взаимно противоположных направлений перемещения материала результирующая составляющая направлена на восток, что говорит о попеременном (приливно-отливном?) режиме на фоне направленного на восток вдольберегового потока наносов².

Саблинская свита, верхняя подсвита (C_2sb_2). В верхней части саблинской свиты периодически встречаются асимметричные знаки ряби со следующими параметрами: длина 30–50 см, высота 3–

6 см, индекс ряби 6–7 до 10, соотношение пологого склона к крутому изменяется в пределах 1–3.

Специфический облик этой пачке придают относительно мощные и, главное, протяженные однонаправленные (преимущественно на восток) косої серии (рис. 5). Мощность серий составляет 25–35 см, протяженность – не менее 10 м. Слоевые швы прямые, субгоризонтальные.

В западной части Ленинградской области в песчаниках появляются деформированные и опрокинутые косо-слоистые текстуры, имеющие конседиментационный сингенетический характер (рис. 6), что, вероятнее всего, указывает на разрушение песчаных гряд при увеличении скорости потока выше критической величины возможности их существования [Рейнек, Сингх, 1981]. При этом общее восточное направление

² Под вдольбереговым потоком наносов понимается однонаправленное результирующее перемещение наносов вдоль берега за большой интервал времени. Перемещение наносов может происходить как под действием волновой энергии, так и течений различной природы (например, ветровых или приливных) [Морская ..., 1980].



Рис. 5. Однонаправленные косослоистые серии в песчаниках Саблинской свиты.

падения косослойчатых серий сохраняется в пределах всей площади распространения верхнесаблинской подсвиты.

По характеру текстур можно заключить, что образование толщи происходило при устойчивом гидродинамически активном режиме под воздействием преимущественно однонаправленного, существовавшего длительное время потока, интенсивность которого уменьшалась с запада на восток. Существенно преобладало перемещение восточных румбов (см. рис.4б).

Ладожская свита ($C_3 Id$) с размывом залегает на саблинских песчаниках с базальными галечниками (глинистыми окатышами) в основании. Выше располагаются косослойчатые песчаники с сериями небольшой мощности (15–20 см) и длины (1–1.5 м). Косая слойчатость плоскостная перекрестная разнонаправленная, слойки подчеркнуты раковинами лингулат. В кровле косослойчатых песчаников развиты симметричные знаки ряби предположительно волнового происхождения.

Очевидно, что базальный слой ладожской свиты был сформирован в условиях надкритической размывающей скорости потока. Затем осаждение основной части ладожской свиты происходило в гидродинамически менее активных условиях (вероятно, связанных с увеличением глубины бассейна) под воздействием волнений различных румбов и приливно-отливных течений. Азимуты направления падения косых слойков указывают на попеременную субширотную миграцию песчаного материала на фоне результирующего вдольберегового потока наносов восточного направления (рис.4в).

Тосненская свита $O_1 ts$. Главным текстурным признаком, определяющим облик этой свиты, является горизонт троговой перекрестной слойчатости мощностью 1–1.2 м, залегающий либо на



Рис. 6. Деформированные косослойчатые седиментационные текстуры в отложениях Саблинской свиты.

базальных косослойчатых песчаниках мощностью около 20 см, либо при их отсутствии над контактом с ладожской свитой. Данный вид слойчатости описан в литературе как возникающий в результате движения по дну серповидных песчаных гряд, которые формируются под воздействием сильного, но главное турбулентного потока [Кутырев, 1968; Шванов, 1987]. Высота существовавших гряд, видимо, соизмерима с мощностью косых серий и изменяется от 8–9 см до 20 см.

От подошвы к кровле наблюдается изменение слойчатых текстур от косослойчатых базальных к троговой слойчатости, которая затем переходит в косую плоскостную параллельную или перекрестную с уменьшением вверх по разрезу мощностей косослойчатых серий вплоть до появления мелких неясно косоволнистых текстур.

На розе-диаграмме падения слойков в песчаниках тосненской свиты различаются два перекрестных направления перемещения материала: основное субширотное (см. рис. 4г) с преобладанием восточного направления, и дополнительное субмеридиональное с преобладающим направлением Ю – ЮЗ.

Можно сделать вывод, что образование песков тосненской свиты происходило под влиянием интенсивного турбулентного потока, который с течением времени переходил в умеренный ламинарный. Попеременная миграция наносов происходила в условиях основного перемещения материала в восточном направлении.

Таким образом, в разрезе исследованной терригенной кембро-ордовикской толщи наблюдается закономерное увеличение гидродинамической активности при формировании пород в пределах саблинской свиты от подошвы к кровле и последовательное ее уменьшение во время образования ладожской и тосненской свит. В целом по

Таблица 1. Гранулометрические параметры основных стратиграфических подразделений

	Саблинская свита (Є ₂ sb)			Ладожская свита (Є ₃ ld)			Тосненская свита (O ₁ ts)		
	запад	центр	восток	запад	центр	восток	запад	центр	восток
Ma, мм	0.28	0.18	0.16	0.13	0.23	0.12	0.30	0.26	0.21
σ, мм	0.56	0.61	0.62	0.41	0.59	0.48	0.57	0.53	0.64
As	2.22	1.5	1.76	1.12	1.9	1.35	2.25	1.9	1.58
Ex	10.9	9.6	12.8	4.4	5.4	6.2	17.5	15.3	21.5
Hg (энтропия)	0.65	0.59	0.54	0.72	0.61	0.64	0.61	0.64	0.56

Примечание. Данные по гранулометрии глинистых прослоев толщ не учитывались.

Ma – среднее арифметическое размера зерен, σ – стандартное отклонение, As – асимметрия распределения, Ex – эксцесс, Hg – относительная энтропия распределения.

площади интенсивность гидродинамических процессов уменьшалась с запада на восток, что, по-видимому, связано с увеличением глубины палеобассейна.

В табл. 1 приведены средние значения гранулометрических характеристик исследуемых осадков для выделенных свит среднего кембрия – нижнего ордовика Ленинградской области. При анализе гранулометрических параметров осадков по простиранию можно сделать вывод, что основной тенденцией является уменьшение их крупности, увеличение степени сортированности (σ) и структурной зрелости (эксцесса) с запада на восток.

Общей особенностью строения толщ по разрезу является циклический характер изменения гранулометрических характеристик на фоне мелких флуктуаций этих параметров, амплитуда которых увеличивается к верхам разреза.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКОВ НАНОСОВ

За последние пятьдесят лет было предложено множество формул для расчета параметров потока наносов; в то же время универсальная методика не разработана до сих пор, каждое из имеющихся уравнений имеет свою область применения. Из нескольких моделей расчета выделяются базовые, претендующие на комплексность и универсальность, и их упрощенные варианты, менее точные и ориентированные на решение частных задач, но обладающие более простым математическим аппаратом.

В предлагаемых методиках расчет емкости потока наносов производится по гранулометрическим характеристикам отложений и параметрам среды осадконакопления. Для палеогидродинамических реконструкций параметры среды могут быть установлены с некоторыми ограничениями, обусловленными решением обратной задачи: расчет, основанный на гранулометрических характеристиках исследуемых отложений, отражает

гидродинамические характеристики потока на стадии седиментации, при этом интенсивность потока на стадии транспортировки наносов, очевидно, была выше.

Одним из базовых при инженерно-геологических литодинамических расчетах является метод Эйнштейна [Einstein, 1950]. Метод применим для расчета общего расхода наносов (взвешенных и взвешенных). Условиями его применения являются преобладание придонных наносов, перемещаемых волочением и сальтацией, над взвешенными, а также значительная ширина канала водотока по отношению к его глубине, при которых гидравлический радиус канала (R_h), равный отношению площади поперечного сечения к длине “мокрого периметра” (ширина плюс удвоенная глубина), приблизительно равен глубине канала. Эти особенности расчетного метода Эйнштейна позволяют предположить, что погрешность его применения в условиях придонных течений мелководного морского бассейна, сложенного песчаным материалом, будет минимальной.

Удельный суммарный расход наносов на единицу ширины потока q_t может быть рассчитан по методу Эйнштейна как суммарный расход донных q_b и взвешенных q_s наносов, что можно выразить уравнением:

$$q_t = q_b + \int_0^h C v_x dz, \quad (1)$$

где h – глубина потока; C – концентрация взвешенных наносов; v_x – горизонтальная составляющая скорости в направлении потока (x); z – вертикальная координата.

Опуская сложные математические преобразования, изложенные в монографии “Эрозия и седиментация” [Julien, 1995], получаем уравнение:

$$q_t = q_b [1 + I_1 \ln(30h/d_s) + I_2], \quad (2)$$

где d_s – средний размер взвешенных наносов, а два интеграла I_1 и I_2 имеют численное решение

Таблица 2. Гранулометрические характеристики отложений кембро-ордовикских песчаников

Размер зерен, мм		Гранулометрический состав по возрастным подразделениям, %				Гидравлическая крупность (скорость падения в воде) w , мм/с
фракции	средний (d_s)	Sb ₁	Sb ₂	Ld	Ts	
>0.45		0.64	2.52	3.87	7.12	
0.45–0.22	0.34	21.97	40.21	24.08	36.88	42
0.22–0.11	0.17	49.02	28.48	31.87	44.21	19
0.11–0.055	0.08	22.47	24.34	32.97	9.44	5
<0.055		5.90	4.44	7.21	2.35	
Процентиль	d_{16}	0.082	0.088	0.070	0.106	
	d_{35}	0.112	0.112	0.095	0.150	
	d_{50}	0.134	0.170	0.117	0.190	
	d_{65}	0.168	0.217	0.162	0.220	
	d_{84}	0.220	0.250	0.250	0.280	

Примечание. Sb₁ – Саблинская свита, нижняя подсвита; Sb₂ – Саблинская свита, верхняя подсвита; Ld – Ладожская свита; Ts – Тосненская свита. Процентили d_{16} , d_{35} , и т.д. обозначают размер частиц (мм), по отношению к которому 16, 35 и т.д. процентов частиц имеют меньший размер.

либо рассчитываются с использованием разработанных Эйнштейном номограмм.

Предлагаемая Эйнштейном функция для расчета емкости потока наносов учитывает соотношение различных гранулометрических классов осадка в потоках различной интенсивности. Основываясь на этом, выражение (1) может быть представлено как:

$$q_t = \sum i_i q_{ii}, \quad (3)$$

где i_i – содержание в осадке i -того гранулометрического класса; q_{ii} – удельный расход i -того гранулометрического класса.

Первым шагом при применении метода является получение необходимой информации о донных осадках палеобассейна. Были выделены четыре пространственно устойчивых осадочных комплекса – нижняя и верхняя подсвиты Саблинской свиты, Ладожская и Тосненская свиты. Результаты гранулометрического анализа по 19-ти классам крупности в диапазоне размерностей от >2 мм до <0.01 мм (всего было проанализировано около 450 образцов) были осреднены и сгруппированы для последующей обработки в три гранулометрических класса, каждый из которых представляет не менее 19% от общего объема материала (0.45–0.22, 0.22–0.11, 0.11–0.055 мм), а также рассчитаны другие необходимые показатели (средний размер частиц в классе, скорость осаждения частиц этого размера и процентили d_{16} , d_{35} , d_{50} , d_{65} , d_{84} (табл. 2).

Гидравлическая крупность в табл. 2 рассчитана по формуле:

$$w = (4(G - 1)gd_s/3C_D)^{0.5}, \quad (4)$$

где G – удельный вес частиц; g – ускорение свободного падения; d_s – диаметр частиц, C_D – коэффициент торможения (drag coefficient), связанный с числом Рейнольдса для шаровидных частиц ($Re_p C_D = 24/Re_p$ [Julien, 1995]).

Расчет делается отдельно для каждого выделенного гранулометрического класса, полученные результаты суммируются.

Подробное описание метода Эйнштейна при практических расчетах приведено в работе [Julien, 1995]. Результаты аналогичного расчета, проведенного для КОП Ленинградской области, позволили определить значения удельной емкости потока наносов для каждой из четырех исследованных толщ (табл. 3).

РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СЕДИМЕНТАЦИИ ИССЛЕДУЕМОЙ ТОЛЩИ

Одного параметра удельной емкости потока наносов недостаточно для расчета продолжительности седиментации исследуемой толщи, поскольку этот параметр применим в чистом виде только в случае однонаправленного и стабильного во времени потока наносов. В реальных условиях параметры потоков во времени и пространстве не являются неизменными. Текстуальный анализ отложений, результаты которого изложены

выше, указывает на периодическое изменение направления потока наносов, а также вариации его интенсивности, проявляющиеся в существовании межсвитных и внутрисвитных эрозионных границ (увеличение интенсивности потока) и глинистых прослоев (уменьшение), что необходимо принимать во внимание при расчетах.

Ориентация косой слоистости указывает на периодическое изменение направления потока наносов во всех исследованных толщах при общем преобладании направления восток–юго-восток. При таком режиме потока поступление материала в элементарную ячейку активного слоя и приращение мощности разреза обуславливается разницей противоположных векторов перемещения материала по отношению к общей гидродинамической энергии в элементарной ячейке (сумма всех векторов).

Для оценки суммарной эффективности потока наносов по розе-диаграмме направлений косой слоистости авторами предложен коэффициент асимметрии (K_{as}), рассчитываемый по формуле

$$K_{as} = |V_{+i} - V_{-i}| / \Sigma V_i, \quad (5)$$

где V_i – элементарный вектор падения косослоистых серий, $\Sigma|V_{+i} - V_{-i}|$ – сумма абсолютных значений разностей векторов взаимно противоположных направлений, ΣV_i – сумма значений всех векторов розы-диаграммы. Для симметричного распределения $K_{as} = 0$, для однонаправленного – $K_{as} = 1$. Рассчитанные коэффициенты асимметрии для исследованных толщ приведены в табл. 3.

Детальный анализ эрозионных поверхностей показывает, что в пределах исследованной кембро-ордовикской толщи присутствуют два типа эрозионных границ. Внутри свит эрозионные межслоевые поверхности прерывистые, невыдержанные по простиранию. Такие текстуры обусловлены турбулентным характером и локальной пульсацией скоростей потоков [Берто, 2002] и не оказывают существенного влияния на общую мощность толщи.

Принимая во внимание особенности эрозионных контактов между свитами можно сделать вывод, что площадная эрозия существенно преобладала над глубинной. В этих условиях достоверно определить уровень эрозионного среза исследуемых толщ не всегда возможно, поэтому для наиболее корректной оценки первоначального объема мы принимаем в расчет максимальную выявленную мощность толщи (H_{max}), сознавая, что первоначальная мощность отложений и, соответственно, объем свиты мог быть больше.

Используя рассчитанное значение удельной емкости потока наносов (q_T), коэффициент асимметрии потока (K_{as}), протяженность данной толщи в направлении потока (L), которая на доступном для изучения участке составляет около 200 км, и

Таблица 3. Параметры формирования кембро-ордовикских песчаников Ленинградской области с использованием метода Эйнштейна [1950] и модели “заполнения резервуара” Жульена [1995]

Исследуемая толща	q_T , м ² /сут	K_{as}	L , км	H_{max} , м	t_s , лет
Sb ₁	4.7	0.34	200	8	2755
Sb ₂	8.5	0.63	200	4	409
Ld	5.1	0.49	200	3	656
Ts	3.7	0.47	200	4	1565
Всего:				26	5384

Примечание. q_T – удельная емкость потока (расход наносов) на единицу ширины потока (расчета по методу Эйнштейна); K_{as} – коэффициент асимметрии розы-диаграммы косой слоистости; L – достоверно установленная протяженность исследуемой толщи в пределах региона работ; H_{max} – максимальная мощность толщи; t_s – расчетное время седиментации по формуле (3); Sb₁ – Саблинская свита, нижняя подсвита; Sb₂ – Саблинская свита, верхняя подсвита; Ld – Ладужская свита; Ts – Тосненская свита.

максимальную выявленную мощность исследуемой толщи (H_{max}), время осадконакопления толщи КОП Ленинградской области (t_s) можно рассчитать по формуле:

$$t_s = (H_{max}L) / (q_T K_{ac}). \quad (6)$$

Результаты расчета представлены в табл. 3.

Относительная ошибка входящих в расчет параметров может быть весьма велика, в ряде случаев точно оценить величину относительной ошибки первоначальных параметров крайне сложно, в результате чего мы можем достаточно уверенно говорить только о порядке определяемой величины.

Полученные значения удельной емкости потоков наносов для различных подразделений КОП подтверждают вывод о циклическом регрессивно-трансгрессивном строении толщи, сделанный на основании текстурного анализа. Такое сходство результатов, полученных независимыми методами, указывает на реальность оценки значений седиментационных параметров палеобассейна.

СООТНОШЕНИЕ СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКИХ И СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Таким образом, мы наблюдаем ситуацию, когда продолжительность седиментации существенно отличается от длительности стратиграфического интервала времени, соотносимого с исследуемой толщей, который по разным оценкам варьирует от 20 до 30 млн лет.

Для оценки времени перерывов осадконакопления (перемывов осадков) используем следующую формулу [Романовский, 1977]:

$$V = kH/(T - T^*)p, \quad (7)$$

где V – скорость осадконакопления, k – коэффициент, учитывающий сокращение мощностей первоначально образующихся слоев (поправка на уплотнение), H – максимальная мощность отложений в пределах выделенного стратиграфического подразделения, T – продолжительность этого подразделения (млн лет), T^* – суммарное время перерывов в осадконакоплении, p – мера, учитывающая интенсивность межслоевых размывов в процессе формирования толщи. Тогда время перерывов можно оценить по формуле:

$$T^* = T - kH/Vp. \quad (8)$$

Подставляя в формулу (8) значения $T = 25$ млн лет, $V = 26 \times 10^{-4}$ м/год, $k = 1.2$ (среднее значение уплотнения песков принимаем за 20%), p считаем единицей (внутри слоевые размывы носят локальный характер), мощность равной 26 м. Из этого получаем, что время, соответствующее перерывам, для отложения КОП составляет:

$$T^* = 25 \times 10^6 \text{ лет} - 1.2 \times 26 \text{ м} / 26 \times 10^{-4} \text{ м/год} = \\ = 24.988 \times 10^6 \text{ лет.}$$

Таким образом, рассчитанное реальное время формирования (продолжительность седиментации) соответствует приблизительно 0.05% от возрастного стратиграфического интервала данной толщи. Надо сказать, что полученная с использованием методики Эйнштейна оценка времени седиментации носит консервативный характер. Если исходить из седиментационных характеристик осадков, то получаемое время их формирования оказывается предельно малым в геологических масштабах. В статье Л.Л. Кулямина и Л.С. Смирнова [1973] на основании анализа приливно-отливных циклов указывается, что для аналогичных КОП Прибалтики “чистое” время седиментации оценивается приблизительно в 170 палеосутках (133 для саблинских песчаников среднего-верхнего кембрия и 40 для пакерортских нижнего ордовика) “Полученные цифры шокируют”, как пишут сами авторы [Кулямин, Смирнов, 1973, с. 699]. Такие результаты они объясняют ничтожной сохранностью осадков в подобных разрезах по отношению к стратиграфическому объему времени.

Оценка времени осадконакопления КОП Ленинградской области на основании седиментационного анализа показала, что “чистое время накопления нижнепалеозойских песков можно оценить в 100–200 лет. Парадокс заключается в том, что геологическое время формирования саблинской толщи составляет 10–20 млн лет” [Тугарова и др., 2001, с. 89]. Авторы объясняют это многократным перемывом отложений в мелко-

водных морских условиях с активной литодинамикой, где соседствуют и сменяют друг друга в зависимости от параметров штормов и течений процессы аккумуляции и размыва морского дна.

Подобная ситуация не является уникальной: как указывал С.В. Мейен “Из-за широкого развития скрытых перерывов... в условиях мелководья нередко документируется лишь ничтожная доля общего времени седиментации (0.01–0.001%)” [Мейен, 1989, с. 24].

Поскольку зависимость эрозионных и транспортирующих параметров потока от его скорости носит степенной характер, то в условиях интенсивных гидродинамических процессов основной объем геологической работы (эрозия – перенос – отложение) осуществляется в период активизации и значительно превосходит работу, происходящую в условиях стабильности. Так, для аллювиальных водотоков практически вся эрозионная работа и подавляющая часть аккумулятивной происходит в период паводка и на его спаде [Чалов, 2008]. Деформацию береговой линии в течение года в основном определяют 2–3 наиболее сильных шторма [Руководство..., 1975]. Мощные гидродинамические события в палеобассейнах, связанные (предположительно) с мегацунами, обусловленными тектоническими процессами, могут играть определяющую роль в отложении нижней (морской) молассы, которая завершает полную седиментологическую эволюцию глубоководных океанических желобов [Лаломов, 2007]. В условиях континентального склона при интенсивных динамических процессах, к каким относятся оползни или крупные мутьевые потоки, образование мощных толщ осадков на больших площадях может происходить с геологической точки зрения практически мгновенно.

Для всех этих объектов характерно резкое несоответствие стратиграфической продолжительности, предписываемой данному комплексу отложений, реальному времени седиментации. В строении этих комплексов наряду с элементами, образующимися в интенсивных (а иногда и катастрофических) условиях седиментации, которые представляют основную часть разреза, присутствуют (точнее, должны присутствовать) свидетельства продолжительных перерывов седиментации или эрозии значительной части отложенных осадков. Далеко не всегда эти признаки присутствуют в очевидной форме, причем это относится не только к терригенным отложениям. Как указывает С.И. Романовский “даже в монотонной толще известняков присутствуют скрытые перерывы (диастремы), на которые ... приходится значительная часть времени, ответственного за формирование разреза. Однако, не имея возможности дать хотя бы приблизительные оценки времени перерывов седиментации, геоло-

ги вынуждены закрывать на них глаза. ... В океанах значительная часть времени падает на перерывы в седиментации... Эрозия не может рассматриваться здесь в качестве главной причины неполноты разрезов, хотя и другие причины точно назвать невозможно. Морские геологи придумали удачный обход этой сложной проблемы, назвав время перерывов периодом неотложения осадков. Таким образом, геологическая летопись ... фиксирует короткие интервалы активности, разделенные значительно более длинными интервалами бездействия” [Романовский, 1988, с. 22–23].

Соотношение таких понятий как “скорость седиментации”, “скорость накопления осадков” и “скорость приращения разреза” обсуждается в настоящее время в геологической литературе достаточно широко [Романовский, 1988; Литодинамика ..., 1998; Байков, Седлецкий, 2001 и др.], и это вызвано не только чисто научным интересом. Для очень многих полезных ископаемых осадочного генезиса оптимальное соотношение скоростей седиментации и наращивания разреза являются определяющим фактором их формирования. Так, например, титан-циркониевые россыпи являются продуктом обогащения минералогически зрелых песчаных осадков в условиях стабильных литодинамических процессов умеренной интенсивности [Патык-Кара и др., 2004]. Возможно, что именно фактор относительно быстрой (по геологическим меркам) седиментации КОП послужил причиной того, что, несмотря на стечение многих благоприятных факторов (наличие источника тяжелых рудных минералов в изверженных и метаморфических породах Балтийского щита, наличие промежуточных коллекторов титан-циркониевых минералов в позднекембрийских и раннекембрийских осадочных комплексах, минералогическая зрелость КОП северо-запада Русской платформы), промышленные россыпи титан-циркониевых минералов в этом регионе до сих пор не выявлены.

Скорость осадконакопления оказывает непосредственное влияние на процесс образования полезных ископаемых на стадии седиментации. Это проявляется в процессе формирования россыпей и, по всей вероятности, хемогенных осадков седиментационной серии. Поэтому знание реальной скорости отложения осадков важно не только для литологии и седиментологии, но и при исследовании процессов образования осадочных полезных ископаемых

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование литодинамических инженерно-геологических расчетов для оценки продолжительности седиментации песчаной части кембро-ордовикского комплекса отло-

жений Ленинградской области показало, что с геологической точки зрения эти песчаники были образованы практически мгновенно, седиментационное время образования толщи составляет не более 0.05% от ее стратиграфического возрастного интервала. Данная работа подтвердила взгляды предыдущих исследователей на весьма быстрое образование толщи, в ней дана количественная оценка процесса седиментации.

Условия, при которых седиментационное время существенно отличается от стратиграфического, характерны не только для мелководных платформенных терригенных формаций, какими являются КОП северо-востока Русской платформы, но и для ряда других осадочных формаций. Поэтому традиционный метод расчета скорости накопления осадков делением мощности толщи на продолжительность соотносимого с нею интервала стратиграфической шкалы может дать заведомо заниженную оценку.

Поскольку скорость осадконакопления непосредственно влияет на образование осадочных полезных ископаемых седиментогенной серии (россыпи и частично хемогенные руды), при изучении осадочного рудогенеза необходимо учитывать реальную скорость осадкообразования.

Выражаем благодарность сотруднику геологического факультета СПбГУ М.В. Платонову за помощь в проведении полевых исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Ги Берто (Франция) и РФФИ (грант № 09-05-00268-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Байков А.А., Седлецкий В.И.* О сверхвысоких скоростях терригенной седиментации на континентальном блоке в фанерозое // Проблемы литологии, геохимии и осадочного рудогенеза. М.: Наука, 2001. С. 93–108.
- Берто Г.* Анализ основных принципов стратиграфии на основе экспериментальных данных // Литология и полез. ископаемые. 2002. № 5. С. 509–515.
- Ботвинкина Л.Н.* Методическое руководство по изучению слоистости. М.: Наука, 1965. 259 с.
- Гейслер А.Н.* Новые данные по стратиграфии и тектонике нижнего палеозоя северо-западной части Русской платформы // Материалы по геологии европейской территории СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1956. С. 174–184.
- Геология и геоморфология Балтийского моря. Сводная объяснительная записка к геологическим картам М 1 : 500000 / Под ред. Григялис А.А. Л.: Недра, 1991. 160 с.
- Гришин Н.Н.* Механика придонных наносов. М.: Наука, 1982. 160 с.
- Гурвич С.И.* Закономерности размещения редкометалльных и оловоносных россыпей. М.: Недра, 1978. 227 с.

- Дронов А.В., Федоров П.В.* Карбонатный ордовик окрестностей Санкт-Петербурга: стратиграфия желтяков и фризов // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер. Геология, география. 1995. Вып. 2. № 14. С. 9–16.
- Кулямин Л.Л., Смирнов Л.С.* Приливно-отливные циклы осадконакопления в кембро-ордовикских песках Прибалтики // Докл. АН СССР. Сер. геол. 1973. Т. 212. № 1–3. С. 696–699.
- Кутырев Э.И.* Условия образования и интерпретация косой слойчатости. Л.: Недра, 1968. 128 с.
- Лаломов А.В.* Реконструкция палеогидродинамических условий образования верхнеюрских конгломератов Крымского полуострова // Литология и полез. ископаемые. 2007. № 3. С. 298–311.
- Литогеодинамика и минерагения осадочных бассейнов. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. 480 с.
- Мейен С. В.* Введение в теорию стратиграфии. М.: Наука, 1989. 212 с.
- Морская геоморфология. Терминологический справочник. М.: Мысль, 1980. 280 с.
- Патык-Кара Н.Г., Гореликова Н.В., Бардеева Е.Г.* К истории формирования титано-циркониевых песков месторождения Центральное в европейской части России // Литология и полез. ископаемые. 2004. № 6. С. 451–465.
- Попов Л.Е., Хазанович К.К., Боровко Н.Г.* и др. Опорные разрезы и стратиграфия кембро-ордовикской фосфоритоносной оболовой толщи на северо-западе Русской платформы. Л.: Наука, 1989. 222 с.
- Рейнек Г.Э., Сингх И.Б.* Обстановки терригенного осадконакопления. М.: Недра, 1981. 439 с.
- Романовский С.И.* Физическая седиментология. Л.: Недра, 1988. 240 с.
- Руководство по методам исследования и расчета перемещения наносов и динамике берегов при инженерных изысканиях. М.: Гидрометеоиздат, 1975. 239 с.
- Рухин Л.Б.* Кембро-силурийская песчаная толща Ленинградской области // Ученые записки ЛГУ. Серия геол.-почв. наук. Вып. 4. 1939. № 11. С. 89–101.
- Тугарова М.А., Платонов М.В., Сергеева Э.И.* Литодинамическая характеристика терригенной седиментации кембро-нижнеордовикской толщи Ленинградской области // Историческая геология и эволюционная география. СПб.: Изд-во НОУ Амадеус, 2001. С. 81–91.
- Ульст Р.Ж.* Нижнепалеозойские и силурийские отложения Прибалтики и содержание в них рассеянного органического вещества. Рига: Изд-во АН Латв. ССР, 1959. 114 с.
- Фролов В.Т.* Литология. М.: Изд-во МГУ, 1992. 336 с.
- Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
- Шванов В.Н.* Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). Л.: Недра, 1987. 269 с.
- Bagnold R.A.* Flow of cohesionless grains in fluid // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 1956. № 954. P. 235–297.
- Einstein H.A.* The bed load function for sediment transport in open channel flow // Technical bulletin no 1026. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950. P. 1–78.
- Hjulstrom F.* The Morphological activity of rivers as illustrated by river Fyris // Bulletin of the Geological Institute, Uppsala. 1935. № 25. P. 89 – 122.
- Julien P.* Erosion and sedimentation. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 280 p.