

для мерзлых пород. Иначе говоря, наличие поглощения в перекрывающих целевую границу отложениях приводит к тому, что градиенты талых и мерзлых пород сближаются, и задача выявления кровли мерзлых пород осложняется.

**Выводы.** 1. Практическое использование выявленной закономерности нельзя реализовать без дополнительных сведений о свойствах отложений, перекрывающих целевую границу. В первую очередь необходимо иметь представление не только о величине эффективной скорости, но и об интервальной скорости в покрывающей толще.

2. В случае, когда интервальная скорость оказывается меньше скорости звука в воде, использование AVO-параметров может приводить к ошибочным выводам. В случае, когда интервальная скорость составляет 1600 м/с и больше и целевая отраженная волна является наиболее интенсивной, величины градиента и относительного градиента позволяют отличить мерзлые подстилающие породы от талых.

3. В случае аномально низкоскоростных отложений (например, газонасыщенных слоев) возникают

проблемы как разрешающей способности, так и недопустимо больших погрешностей при определении AVO-параметров.

4. В условиях развития низкоскоростных поглощающих перекрывающих отложений единственным способом выявления кровли мерзлых пород является метод преломленных волн — метод первых вступлений, позволяющий определить кажущуюся граничную скорость. В условиях, когда получить систему встречных годографов крайне затруднительно с методической точки зрения, совместное использование кинематики первых волн и сведений о рельефе изучаемой границы, полученных по данным метода отраженных волн, позволяет, если необходимо, перейти от кажущейся граничной скорости к истинной граничной скорости. Поскольку ожидаемые скорости в мерзлых породах составляют более 3000 м/с, то указанный прием дает возможность достаточно надежно идентифицировать кровлю мерзлых пород.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 95-05-64514).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalinin A.V., Shalaeva N.V. New approach to the solution of the dynamic problem of AVO analysis // Soc. of exploration geophysicists. Technical Program. Expanded Abstr. 66 Annual Meeting and Internat. Exposition, Nov. 10—15, 1996. P. 1370—1372.

2. Offset-dependent reflectivity — theory and practice of AVO analysis / Ed. by J.P. Castanga and M.M. Backus. Society of exploration geophysicists, USA. Tulsa, 1995.

Поступила в редакцию  
27.01.99

УДК 624.131.4

**Е.А. Вознесенский, Е.Н. Самарин, Е.Б. Кудряшова**

### ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПЕРЕУПЛОТНЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ТОЛЩ В ЮГО-ЗАПАДНОМ КРЫМУ

Глинистые породы проявляют исключительную чувствительность к изменению физико-химических потенциалов, характеризующих условия их нахождения в верхних слоях литосферы, что позволяет использовать характеристики их состава и структуры для реконструкции истории формирования пород, причем наиболее информативна в этом смысле именно структура глинистых образований.

Первые данные о закономерностях изменения пористости и плотности глин по разрезу появились в первой половине XX в. (G. Hedberg, 1926; L. Athy, 1930). В России этот вопрос с различных позиций

рассматривали Г.А. Максимович (1944), О.А. Шванко (1948), А.Т. Донабедов (1949), В.Д. Ломтадзе (1954, 1955), Н.Б. Вассоевич (1954, 1955, 1958), С.И. Субботин (1955), Э.А. Прозарович (1956), Э.Э. Фотиади (1957) и др. Характер компрессионных кривых глин всесторонне изучен в работах А. Casagrande (1932, 1936), А.С. Хромушева (1939), Ф.П. Саваренского (1940), Г.П. Мазурова и В.В. Охотина (1947), А.А. Луга (1953, 1954), В.Д. Ломтадзе (1951), N. Janbu (1963), в которых сделаны попытки восстановления величины нагрузок, испытанных породой в геологическом прошлом. Эта задача обычно решается двумя мето-

дами. В первом случае определяется абсцисса точки перегиба (рис. 1), наблюдаемого на компрессионных кривых вида  $e = f(\lg \sigma)$  (где  $e$  — коэффициент пористости, а  $\sigma$  — напряжение), она определяется структурной прочностью грунта и отвечает резкому повышению его сжимаемости при превышении нагрузки, которая равна максимальному геостатическому давлению, испытанному породой [3, 5], и именуется “нагрузкой предварительного уплотнения” ( $\sigma_p'$ ). Второй метод предполагает параллельные компрессионные испытания образцов нарушенного и естественного сложения. Считается, что кривые компрессионного сжатия должны слиться при  $\sigma_p'$ , однако это утверждение не имеет теоретического обоснования.

Полученная по методике А. Казагранде [3] величина  $\sigma_p'$  позволяет рассчитать максимальную из когда-либо существовавших мощность перекрывающих толщ (если известна их плотность), а соотношение  $\sigma_p'$  и современного природного напряжения на заданной глубине в толще пород  $\sigma_{ov}'$  определяет степень переуплотнения глин  $OCR = \sigma_p' / \sigma_{ov}'$ . Однако эта методика не учитывает ряд факторов, приводящих к существенному увеличению прочности структурных связей на протяжении геологического времени. Важнейшими из этих факторов являются [6]: высыхание глин (при испарении, замерзании, вытягивании влаги корнями растений), длительное уплотнение (“отложенная” консолидация, по Л. Бьеррму), колебания уровня подземных вод, цементация, ионообменные процессы, тиксотропное упрочнение. Особенно выражены перечисленные эффекты для сильно литифицированных глин, что отражается и в дополнительных перегибах на компрессионных кривых [1].

Для корректировки экспериментально определяемой величины  $\sigma_p'$  мы предлагаем модель формирования переуплотненных глин с учетом их цементации и старения (рис. 2). В общем случае зависимость  $e = f(\lg \sigma_p')$  является пропорциональной:

$$e = e_0 - C \lg \frac{\sigma_i'}{\sigma_0'}, \quad (1)$$

где  $e_0$  и  $\sigma_0'$  характеризуют начальное состояние образца, а  $C$  — здесь и далее коэффициент компрессии. Пористость отложений при накоплении вышележащих осадков уменьшается вдоль линии нормального уплотнения (участок OA) до прекращения осадконакопления, что соответствует достижению  $\sigma_p'$ . Дальнейшее уплотнение обусловлено геологически длительной консолидацией глины под нагрузкой  $\sigma_p'$  (участок AB). В последующем возможны

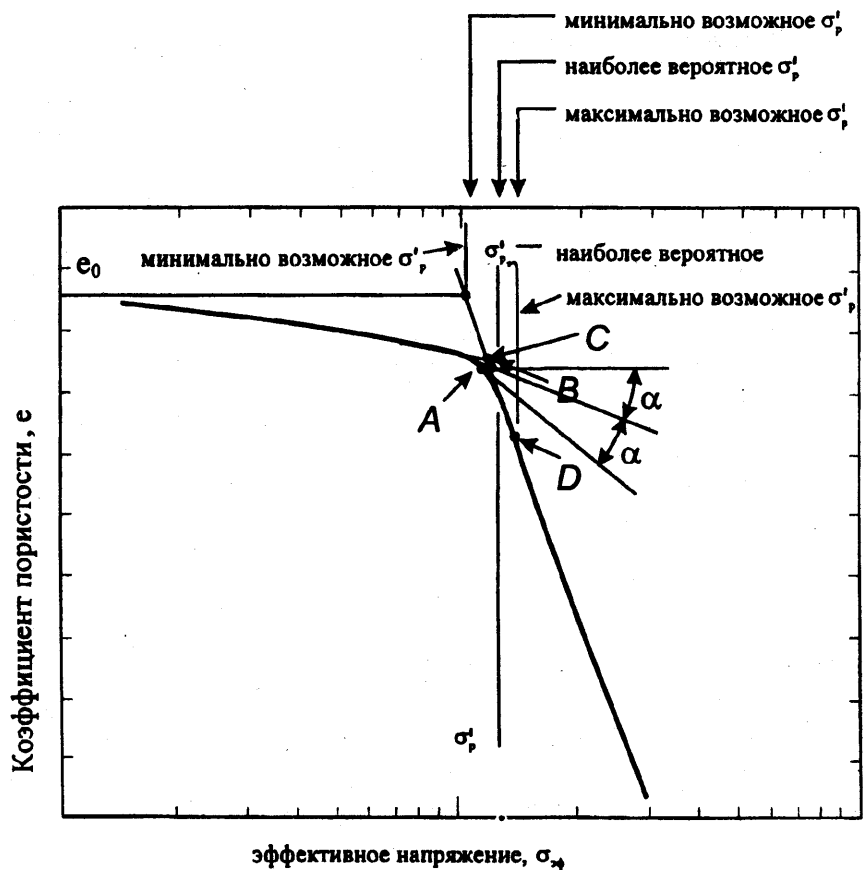


Рис. 1. Графическая модель формирования переуплотненных глин

два варианта развития событий: эрозия и устойчивое снижение геостатической нагрузки (участок BC), описываемое уравнением

$$e = e_0 - C_0 \lg \frac{\sigma_p'}{\sigma_{ov}'}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{ov}'$  — современное природное давление, а  $e_0$  — соответствующий ему коэффициент пористости глины либо нормальное уплотнение в условиях длительной консолидации, которое описывается аналогичным по виду уравнением

$$e_{pi} = e_p - C_p \lg \frac{\sigma_{pi}'}{\sigma_p'}. \quad (3)$$

В результате экспериментальная компрессионная кривая образца глины будет соответствовать линии CB'D'D. Точка D ( $\sigma_{pi}', e_{pi}$ ) совпадает в этом случае с последним из перегибов, наблюдаемых на компрессионной кривой образца, и отвечает как раз нормальному уплотнению в условиях длительной консолидации (т.е. лежит на линии BD). Следует принять во внимание, что для древних литифицированных глин со смешанным типом структурных связей участок BD окажется положе линии нормального уплотнения OA в силу резкого снижения сжимаемости породы в ходе длительной консолидации. Точка B' будет лежать выше точки B только тогда, когда в породе выражены эффекты старения и цементации, причем последняя происходила на этапе эрозивной разгрузки осадочной толщи.

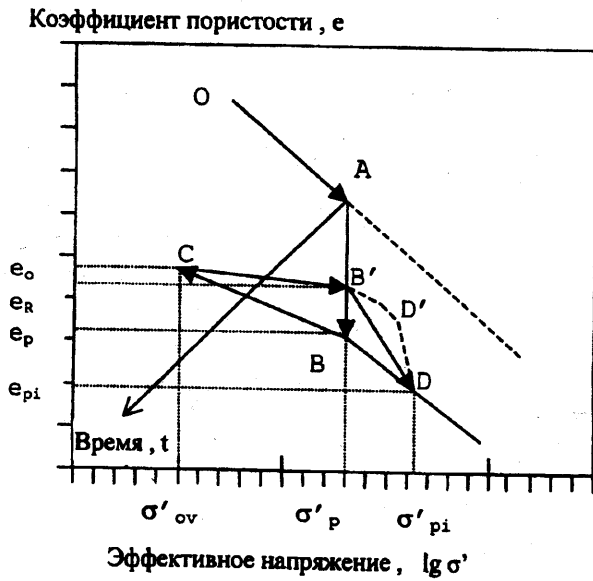


Рис. 2. Схема А. Казагранде (1936) для определения давления предварительного уплотнения. Буквенные обозначения см. в тексте

Экспериментальную кривую уплотнения можно представить двумя прямолинейными участками СВ' и В'D, которые описываются однотипными уравнениями:

$$e_R = e_0 - C_R \lg \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{ov}}, \quad (4)$$

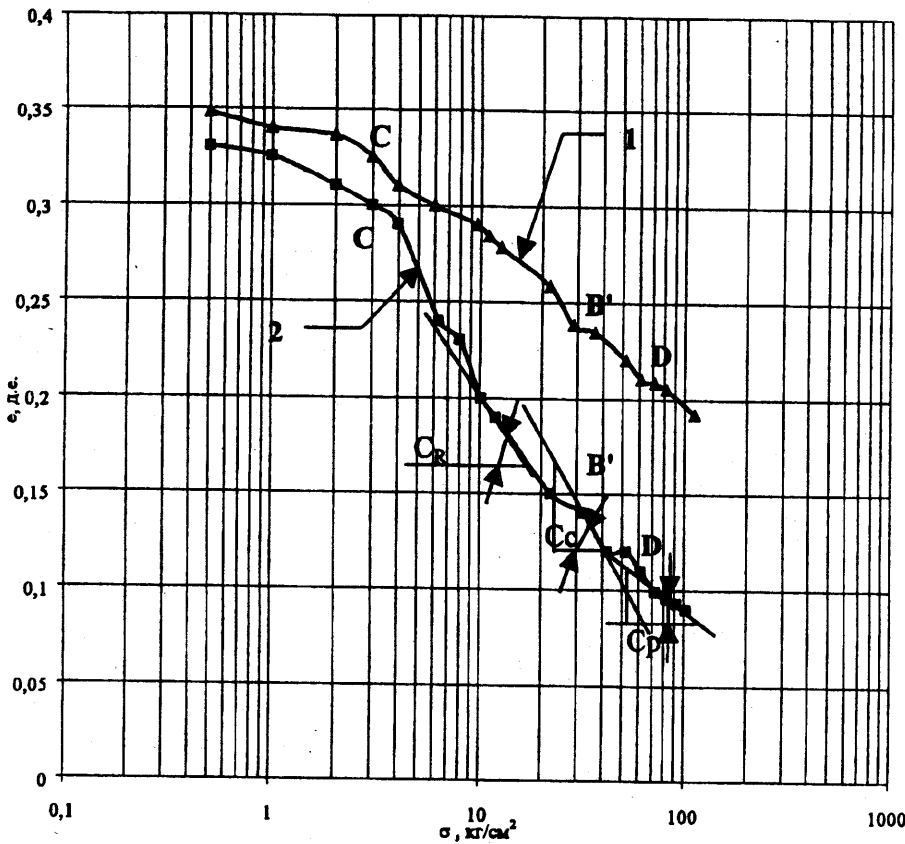


Рис. 3. Компрессионные кривые глин биялинской свиты (K<sub>1</sub>br<sub>2</sub>-a): 1 — We = 14%; 2 — We = 15%

$$e_{pi} = e_R - C_C \lg \frac{\sigma'_{pi}}{\sigma'_p}. \quad (5)$$

Решение полученной системы четырех линейных уравнений, различающихся только угловыми коэффициентами, относительно  $\sigma'_p$  запишется в виде:

$$\sigma'_p = (\sigma'_{pi} \cdot \sigma'_{ov} \cdot 10^k)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $k = (C_C - C_P) / (C_0 - C_R)$ ,  $\sigma'_{ov}$  — современное природное давление на заданной глубине, а  $\sigma'_{pi}$  — напряжение, соответствующее точке последнего перегиба компрессионной кривой. В этом случае коэффициенты компрессии  $C_R$ ,  $C_C$  и  $C_P$  определяются на основе компрессионных испытаний глин в естественном сложении, а  $C_0$  — по компрессии паст как тангенс угла наклона ветви разгрузки (рис. 3, 4).

Глины биялинской свиты (K<sub>1</sub>br<sub>2</sub>-a), образовавшиеся в режиме непрерывного прогибания морского бассейна глубиной до 600 м, залегают в виде изометричного тела линзовидной формы мощностью до 100 м на междуречье Качи и Бодрака. Лучшее всего породы обнажены в долине р. Кача, где они имеют мощность около 100 м и слагают южный склон г. Белая, перекрытый маломощным (до 1—1,5 м) слоем делювиальных образований. В естественном залегании глины светло-серого цвета, плотные, неслоистые, с раковистым изломом, при механическом воздействии образуют оскольчатую отдельность. В минеральном составе преобладают кварц (32—46%), кальцит (20—33%) и глинистые минералы (23—29%), представленные в основном гидрослюдой с примесью (до 20—25%) смешанослойных монтмориллонит-иллитов и каолинита. Порода характеризуется матричной микроструктурой [1].

Рыхлый материал, образующийся при выветривании пород на достаточно крутом склоне, легко сносится поверхностными водами, и глины слабо изменены уже на глубине около 1 м от склона. Здесь толща разбита тонкими свежими трещинами разгрузки напряжений на отдельные изометричные блоки около 0,5 м в поперечнике, внутри которых породы практически не затронуты выветриванием и сохраняют сплошность. Из внутренних частей таких блоков с глубины 1,5 м от склона в его средней части (70 м выше подошвы) были отобраны два монолита глин для лабораторных исследований. Их плот-

ность составила 2,3, плотность скелета грунта — 2,0, плотность твердой фазы — 2,72 г/см<sup>3</sup>, влажность — 14–15%, пористость — 25–26%, предел пластичности — 26%, число пластичности — 13–14%, содержание частиц < 2 мкм — 41–43% (все показатели определены по стандартным методикам [2]).

Компрессионные кривые для глин и образцов нарушенного сложения (начальная влажность — 70%, плотность скелета — 2,1 г/см<sup>3</sup>), показанные на рис. 3 и 4, как и отмечалось ранее [1], представляют собой ломаные линии, на которых обозначены характерные участки, упомянутые при описании модели уплотнения породы: начальный участок (до точки С) соответствует восстановлению глины до ее природного состояния в массиве, включая и смыкание микротрещин, возникших при разгрузке напряжений; участок СВ' отвечает уплотнению под нагрузкой, не превышающей структурную прочность, на участке В'Д происходит активное разрушение структурных связей, а его крайняя точка D соответствует выходу на кривую нормального уплотнения.

Для исследованных глин биясалинской свиты максимальное геостатическое напряжение  $\sigma_p'$ , рассчитанное по методу А. Казагранде, в среднем составляет 4,4 МПа. Расчеты же  $\sigma_p'$  с учетом эффектов цементации и старения по предлагаемой модели формирования переуплотненных глин приводят к следующим результатам<sup>1</sup>. Значения коэффициентов компрессии  $C_c$ ,  $C_R$  и  $C_p$ , вычисленные по соответствующим участкам компрессионных кривых образцов естественного сложения, в среднем составили  $C_c \approx 0,003$ ,  $C_R \approx 0,04$  и  $C_p \approx 0,002$  (рис. 3). Значение коэффициента декомпрессии для образца нарушенного сложения  $C_0$  в диапазоне нагрузок от  $\sigma_p'$  до  $\sigma_{ov}'$  составило 0,01 (рис. 4). Величина современной природной нагрузки  $\sigma_{ov}'$  испытываемой грунтами в их естественном залегании, рассчитана на основании плотности (в среднем 2,0 г/см<sup>3</sup>) вышележащих пород и их современной мощности (115 м) и равна приблизительно 2,3 МПа. Значение напряжения  $\sigma_{pi}'$ , определяемого графически как абсцисса последней

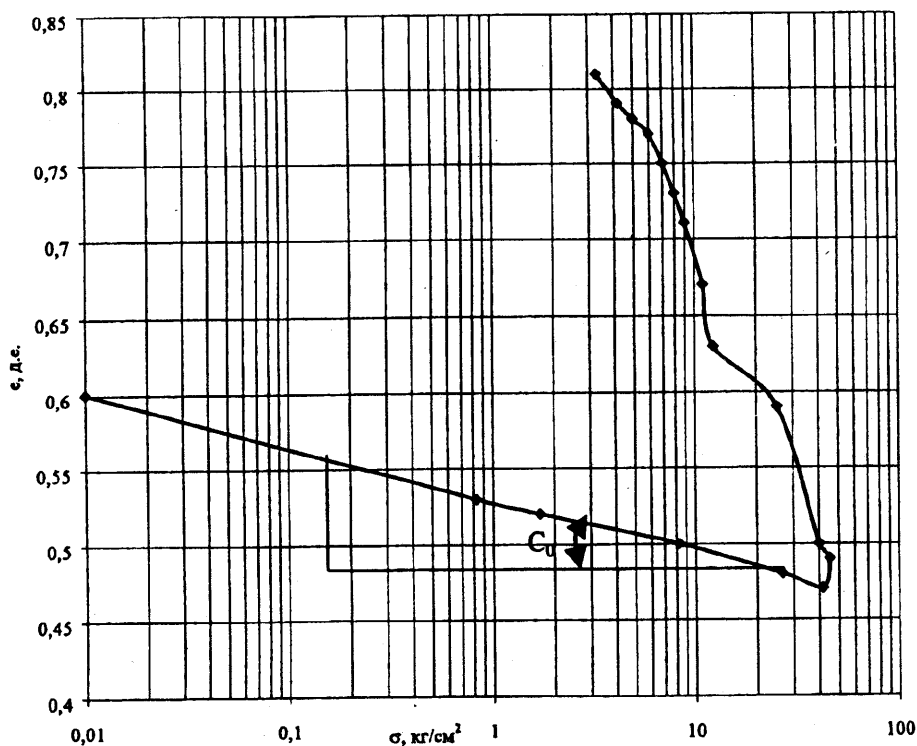


Рис. 4. Компрессионная кривая образца нарушенного сложения — глины биясалинской свиты

точки перегиба компрессионной кривой, равно 7,0 МПа. Таким образом, в соответствии с выражением (6) величина  $\sigma_p'$  составит 4,1 МПа, что на 0,3 МПа меньше ее значения, полученного по методу А. Казагранде. Эта разница, вероятно, связана с частичной цементацией исследуемых глин карбонатами, играющими роль контактного цемента. Разрушение цементационных контактов с заметным увеличением сжимаемости, как видно из приведенных компрессионных кривых, происходит в интервале от 0,5 до 2,1 МПа, что свидетельствует о возникновении цементации в породе при разгрузке на этапе денудации.

Степень переуплотнения биясалинских глин, рассчитанная по отношению  $\sigma_p'$  и  $\sigma_{ov}'$  составила 1,7. Расчетная величина максимального геостатического напряжения позволяет реконструировать мощность отложений, размытых здесь за новейший этап развития территории: значение  $\sigma_p'$ , равное 4,1 МПа при средней плотности перекрывающих пород 2 г/см<sup>3</sup>, соответствует 192 м, что на 77 м превышает современную мощность отложений над уровнем опробования биясалинских глин в разрезе г. Белая<sup>2</sup>.

Исследования выполнены при поддержке программы “Университеты России — фундаментальные исследования” (грант № 5606 проекта “Кристалл”) и РФФИ (грант № 98–05–64896).

<sup>1</sup> Приводятся средние для изученных образцов экспериментальные и расчетные параметры компрессионных кривых.

<sup>2</sup> Полученный масштаб эрозии согласуется и с нашими новыми расчетами по приведенной модели для других отложений, отобранных из скважины с глубины более 40 м на расстоянии всего несколько километров от г. Белая, что подтверждает слабую изменчивость глин выветриванием на глубине опробования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вознесенский Е.А., Самарин Е.Н., Шешина А.Б.* Инженерно-геологические особенности глинистых пород междуречья Качи — Бодрака // Очерки геологии Крыма / Под ред. Е.Е. Милановского. Вып. 1. М., 1997. С. 97—119.
2. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. М., 1984. Т. 1, 2.
3. *Casagrande A.* The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. Disc. D-34 // Proceed. of the 1st Internat. Conf. on Soil Mechanics & Foundation Engineering. Cambridge, 1936. Vol. III. P. 60—64.

4. *Holtz R.D., Kovacs W.D.* An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall, 1981. P. 294—298.
5. *Janbu N.* Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests // Europ. Conf. Soil Mechanics & Foundation Engineering. Weisbaden, 1963. Vol. 1. P. 19—25.
6. *Jamiolkowski M., Ladd C.C., Germaine J.T.* et al. New developments in field and laboratory testing of soils // Proceed. of the 11th Int. Conf. Mechanics & Foundation Engineering. San Francisco, 1985. Vol. 1. P. 57—153.

Поступила в редакцию  
19.02.99

## ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ

## ПАМЯТИ НАШИХ УЧИТЕЛЕЙ И КОЛЛЕГ

24 ноября 1999 г. на геологическом факультете МГУ прошла конференция “Наши учителя и коллеги — инженер-геологи Московского университета”, организованная кафедрой инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ и Московским обществом испытателей природы. В работе конференции приняли участие около 100 человек. Среди них — выпускники кафедры разных лет, сотрудники различных организаций Москвы, Подмосковья, Нижнего Новгорода, сотрудники кафедр и библиотеки геологического факультета и родственники тех сотрудников кафедры, кому посвящена конференция.

На конференции было оглашено 6 докладов. Открыл конференцию заведующий кафедрой инженерной и экологической геологии профессор В.Т. Трофимов. В своем докладе “Заведующие кафедрой — М.М. Филатов, С.С. Морозов, П.П. Смирнин, Е.М. Сергеев и первые ее профессора — И.В. Попов, Н.В. Орнатский” он остановился на роли каждого из них в развитии кафедры и инженерной геологии.

Остальные доклады были посвящены доцентам, старшим научным сотрудникам кафедры, работавшим на ней в различные годы. В связи с тем что их деятельность на кафедре впервые обсуждалась публично, в докладах поднимались вопросы, связанные не только с их педагогической деятельностью, но и с биографическими данными.

Доклад А.С. Герасимовой был посвящен жизни и деятельности старейших сотрудников кафедры,

работавших на ней в 40-е — 50-е годы, — доцентам Н.И. Быковскому и П.Ф. Мельникову. В докладе Н.А. Ларионовой освещена роль ассистента Е.Г. Борисовой, старших научных сотрудников В.Г. Самойлова и Л.А. Евдокимовой в разработке вопросов технической мелиорации грунтов. Доклад В.Н. Соколова касался жизни и деятельности широко известных ученых в области инженерной геологии и преподавателей кафедры — доцента М.Н. Троицкой, старших научных сотрудников Г.Г. Ильинской, Г.А. Куприной.

Н.С. Красилова подробно осветила вклад старших научных сотрудников С.С. Полякова, П.И. Фадеева и доцента С.Н. Максимова в развитие инженерной геологии.

В докладе Э.В. Калинина рассмотрена деятельность более молодого поколения инженер-геологов, безвременно ушедших из жизни, — доцента В.Я. Калачева, ведущего научного сотрудника В.С. Федоренко, старшего научного сотрудника Г.М. Терешкова.

Все доклады содержали много интересных и нигде неопубликованных данных о жизни и научном вкладе всех перечисленных ученых и были прослушаны присутствующими с большим вниманием.

К началу работы конференции выпущен сборник “Наши учителя и коллеги — инженер-геологи Московского университета” под редакцией В.Т. Трофимова, в котором каждому ученому посвящен отдельный очерк.

А.С. Герасимова