

ХРОНИКА

О НАУЧНОМ НАСЛЕДИИ ПРОФЕССОРА С.С. ВЯЛОВА
(к 100-летию со дня рождения)

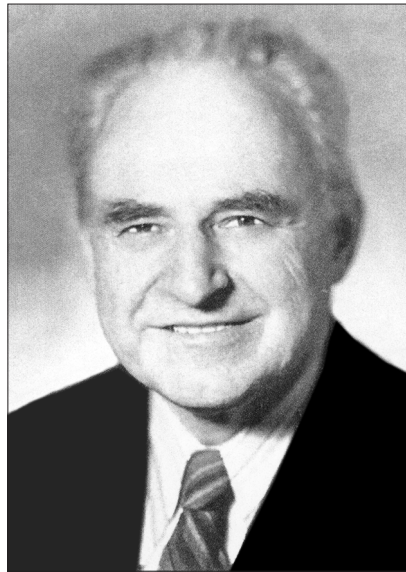
Ю.К. Зарецкий, В.П. Мерзляков*

ОАО "Институт Гидропроект", 125993, Москва, Волоколамское ш., 2, Россия, hydro@hydroproject.ru
*Институт геоэкологии РАН, 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, а/я 145, Россия, cryo2@yandex.ru

ON THE SCIENTIFIC HERITAGE OF PROFESSOR S.S. VYALOV
(on the 100th anniversary)

Yu.K. Zaretsky, V.P. Merzlyakov*

OGSC "Institute Hydroproject", 125993, Moscow, Volokolamskoye sh., 2, Russia, hydro@hydroproject.ru
*Institute of Environmental Geosciences, RAS, 101000, Moscow, Ulansky per., 13, build. 2, P/O box 145, Russia, cryo2@yandex.ru



С.С. Вялов (1910–1998)

Сергей Степанович Вялов родился в октябре 1910 г. в Петербурге, но его детские годы прошли в Ташкенте. С ранних лет у него сформировался широкий круг интересов, чему способствовали культурные традиции семейного окружения. Отец, Степан Ефимович, офицер Генштаба русской армии, погиб на фронте в Первую мировую войну. Семья матери, Марии Феофистовны, принадлежала к передовой русской интеллигенции: одна из ее сестер была директором женской гимназии, две другие сестры – известные профессора геологии. По их стопам пошел и старший брат С.С. Вялова –

Олег Степанович, он был выдающимся геологом, академиком АН УССР. С.С. Вялов, окончив в 1936 г. без отрыва от производства Ленинградский строительный институт, поехал на работу на Крайний Север. В условиях Магадана и Якутска он приобрел практический опыт северного строительства, здесь сложилось основное направление его дальнейшей деятельности – изучение вечной мерзлоты.

С 1945 г. С.С. Вялов занимался научными исследованиями сначала в Институте мерзлотоведения АН СССР, а затем, после его реорганизации, –

в НИИ оснований, пройдя путь от аспиранта до заведующего лабораторией и заместителя директора. Сергей Степанович в своей деятельности никогда не ограничивался рамками чисто научных интересов. Он обладал широкой инженерной эрудицией и всегда был связан с решением крупных народнохозяйственных проблем. Многие исследования проведены им в натуральных условиях: на Игаркской научно-исследовательской мерзлотной станции, в Антарктиде, в экспедициях и непосредственно на строительных объектах. В Игарке с 1950 по 1953 г. С.С. Вяловым были выполнены уникальные по объему и новизне комплексные исследования: проведено около 1300 лабораторных и несколько десятков крупномасштабных полевых опытов, причем продолжительность некоторых из них достигала 20 и более лет. Результаты этих исследований легли в основу монографии “Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов” [1959], в которой сформулированы основные положения теории реологии грунтов. Этот труд коренным образом изменил подход к мерзлым грунтам и ознаменовал собой становление нового – реологического направления в механике мерзлых грунтов. Его результаты позволили в дальнейшем разработать методику прогноза несущей способности мерзлых грунтов с учетом протекающих в них явлений ползучести и релаксации.

В 1956–1958 гг. С.С. Вялов участвовал во Второй антарктической экспедиции, где им были проведены исследования в области механики льда и разработана теория вязкого течения ледниковых куполов. В начале 1960-х гг. Сергей Степанович возглавил работу по решению важной народнохозяйственной задачи – проходки глубоких шахтных стволов с применением искусственного замораживания грунтов. Разработанный им новый реологический подход к оценке поведения ледогрунтовых ограждений был положен в обоснование проекта проходки и крепления глубоких шахтных стволов. Комплексные решения проблем искусственного замораживания пород при проходке горных выработок были удостоены Государственной премии СССР. Результаты исследований обобщены в широко известных коллективных монографиях С.С. Вялова, его сотрудников и учеников: “Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений” [1962], “Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов” [1966], “Расчеты на прочность и ползучесть при искусственном замораживании грунтов” [1981], которые стали основным руководством для специалистов, занимающихся вопросами использования мерзлых грунтов в инженерных целях.

Диапазон научных интересов С.С. Вялова весьма широк. Ему принадлежит решение ряда проблем общей механики грунтов, включая изуче-

ние на микроструктурном уровне физической природы процесса деформирования, создание кинетической теории прочности и ползучести грунтов и применение реологического подхода в нелинейной механике грунтов. Результаты этих работ обобщены в монографии С.С. Вялова “Реологические основы механики грунтов” [1978].

Монография “Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов” [Вялов, 1959] была первой обобщающей работой С.С. Вялова по итогам экспериментально-теоретических работ на Игаркской станции Института мерзлотоведения. В ней дан прекрасный обзор работам в области общей теории прочности, ползучести и релаксации. Дан обзор теорий ползучести: теории старения, теории упрочнения, теории наследственной ползучести. Реологические явления характерны для всех типов грунтов, но в мерзлых грунтах эти явления усиливаются из-за льда-цемента, который подвержен ползучести при любых ненулевых касательных напряжениях. С.С. Вялов показал применимость общей теории реологических процессов к описанию поведения мерзлых грунтов и льда. А его экспериментальные исследования сопротивления мерзлых грунтов вдавливанию штампов и оценка предельных значений сопротивления свай нагрузкам придали этому направлению практическую значимость.

Эта работа С.С. Вялова актуальна и сегодня, спустя 50 лет после ее публикации. Она интересна прежде всего богатством результатов экспериментальных исследований в лабораторных условиях (1300 опытов!). Достаточно вспомнить о таких исследованиях, как

- определение сцепления мерзлых грунтов и изучение изменения сцепления во времени;
- изучение сопротивления сжатию, растяжению и сдвигу мерзлых грунтов, а также реологических процессов в условиях простого напряженного состояния;
- формулировка аналитической зависимости прочности мерзлых грунтов от времени действия нагрузки, подтвержденной многочисленными данными экспериментов:

$$\tau_{дл} = \frac{\beta}{\ln(t_{пр}/B)},$$

где $\tau_{дл}$ – условный предел длительной прочности; $t_{пр}$ – достаточно большой промежуток времени; β, B – константы;

- определение длительного сцепления с помощью шариковой пробы на основании решения Ишлинского для идеально-пластической среды:

$$c_t = 0,18 \frac{P}{\pi d s_t}, \quad (1)$$

где P – нагрузка на шариковый штамп; d – диаметр шарика; s_t – осадка шарикового штампа во времени.

Однако В.Г. Березанцев показал, что для мерзлых грунтов, обладающих внутренним трением, тоже можно использовать шариковую пробу для оценки сцепления введением поправочного коэффициента M :

$$c_t \approx M \cdot 0,18 \frac{P}{\pi ds_t},$$

где параметр M зависит от угла внутреннего трения φ следующим образом:

φ°	0	10	20	30
M	1,0	0,615	0,285	0,122

Н.А. Цытович и С.С. Вялов предложили величину c_t , определяемую формулой (1), рассматривать как комплексную характеристику – эквивалентное сцепление ($c_{\text{эkv}}$).

Это позволило практически оценивать несущую способность оснований из мерзлых грунтов, определяя ее при $c_{\text{эkv}}$ как для “эквивалентной” идеально-пластической среды. Например, для фундаментов:

- ленточных $- P_{\text{пр}} = (\pi + 2)c_{\text{эkv}} + \gamma_{\text{гр}}h_{\text{ф}}$,
- квадратных в плане $- P_{\text{пр}} = 5,71c_{\text{эkv}} + \gamma_{\text{гр}}h_{\text{ф}}$,
- круглых в плане $- P_{\text{пр}} = 5,65c_{\text{эkv}} + \gamma_{\text{гр}}h_{\text{ф}}$,

где $\gamma_{\text{гр}}$ – удельный вес грунта; $h_{\text{ф}}$ – глубина заложения фундамента.

Зависимость изменения эквивалентного сцепления от температуры θ предложено определять в виде $c = c_0 + b\sqrt{|\theta|}$.

До сих пор не потеряли значения описанные в монографии результаты уникальных крупномасштабных опытов по исследованию контактных напряжений фундаментов, взаимодействующих с мерзлыми грунтами основания. Следует обратить внимание на два существенных вывода, которые можно сделать при анализе этих результатов:

- в отличие от талых грунтов основания эпюра контактных давлений с увеличением нагрузки на фундамент трансформируется от “двугорбой” или “равномерной” к “седлообразной”; в опытах не наблюдалась “параболическая” форма эпюры;

- при постоянной нагрузке практически не зафиксирована трансформация во времени эпюр контактных давлений.

После участия С.С. Вялова в Антарктической экспедиции в 1961 г. выходит его интереснейшая статья “Вязкопластическое течение ледниковых покровов”, в которой на основе аналитического решения предсказывается контур ледникового щита $h(x)$. В ней, в отличие от известных работ Вайнберга–Сомильяны и Ная, впервые учитывается такой фактор, как баланс твердых осадков, а

также нелинейный закон вязкопластического течения Глена. Решение Ная явилось частным случаем решения С.С. Вялова:

$$\left(\frac{h}{H}\right)^m + \left(\frac{L-x}{L}\right)^n = 1.$$

Здесь H – высота ледника в центре щита; L – длина ледника, м; x – расстояние по латеральному направлению; n, m – параметры, зависящие от аккумуляции осадков и физических констант льда.

Натурные наблюдения в Восточной Антарктиде по профилю “Мирный–Пионерская–Восток I–Комсомольская” подтвердили контур ледникового щита, предсказанный теоретически профессором С.С. Вяловым с помощью формулы

$$\left(\frac{h}{3,69}\right)^2 + \left(\frac{1200-x}{1200}\right)^2 = 1.$$

В начале 1960-х гг. потребовалась проходка шахтных стволов (диаметр ~9 м, глубина 700 м) для вскрытия богатейшего железорудного месторождения полезных ископаемых Курской магнитной аномалии, залегающего на глубине около 600 м. На глубине 400–500 м залегали полностью водонасыщенные слои глины батбайосса и пльвуны келловейской супеси. Проект вскрытия месторождения был поручен тресту “Шахтспецстрой” Минмонтажспецстроя. Вскрытие месторождения решено было проводить с помощью проходки стволов методом замораживания с образованием ледопородного ограждения ствола из замороженных пород как временной крепи. Обоснование проекта проходки проводилось несколькими институтами: Институтом проблем механики АН СССР, Институтом мерзлотоведения АН СССР, Институтом горного дела АН СССР, МГУ, Московским горным институтом и рядом других организаций. Помимо технологических и технических проблем (таких, например, как проблема хладонителя при низкотемпературном замораживании (–60 °С), вертикальность бурения для установки замораживающих колонок на глубину 700 м и др.), с помощью расчетно-аналитических методов предстояло обосновать важнейшие проектные параметры:

- толщину ледопородного ограждения как временной крепи;
- допустимую величину незакрепленной части ствола в процессе проходки.

Эти рекомендации должны были исходить не столько из условий прочности ледопородного ограждения, сколько из условий предельных деформаций. Дело в том, что металл, из которого собирались замораживающие колонки при температуре –60 °С, становился хладоломким и не выдерживал больших деформаций при их изгибе.

Разрыв же колонок означал бы прорыв хладоносителя в окружающий массив пород и весьма быстрое размораживание, а вслед за этим и разрушение ледопородного ограждения. Поэтому оптимальные размеры ледогрунтового ограждения (его толщина и величина “заходки”) должны были определяться исходя из условий недопустимости радиальных перемещений, больших некоторой заданной величины и реализующихся за срок от начала проходки до установки железобетонных тубингов крепления (минимальное время 24 ч).

Профессор С.С. Вялов смог точно алгоритмизировать поставленную техническую проблему, расчленив ее на составные части и организовать исследовательскую работу. Здесь проявился его талант организатора, инженера и ученого.

Поучительным будет вспомнить, по каким конкретным направлениям С.С. Вялов проводил это комплексное исследование.

1. Изучение текстуры искусственно замораживаемых грунтов (влияние скорости и температуры замораживания).

2. Исследование пучения глинистых грунтов массива при замораживании.

3. Исследование физико-механических и реологических свойств замороженных пород в зависимости от температуры.

4. Изучение реологических свойств в условиях трехосного сжатия, создание нового экспериментального оборудования.

5. Физическое моделирование инженерной задачи.

6. Расчетные исследования пространственной задачи (и это в 60-е годы!): ледопородное ограждение ограниченной высоты, взаимодействие с окружающим немерзлым массивом горных пород.

7. Расчетная оценка температурного поля, температурных деформаций и т. д.

В 1970-е гг. круг научных интересов С.С. Вялова существенно расширился. Он с присущей ему энергией и неутомимой жадностью нового интенсивно работает над проблемами реологии глинистых немерзлых грунтов. Здесь его внимание обращено на общность реологического поведения грунтов различного состава и состояния, включая грунтовые суспензии, мерзлые и талые грунты, пески, глины и скальные породы. В связи с этим С.С. Вялов формулирует уравнения состояния, справедливые для широкого спектра геоматериалов. Анализируя особенности деформирования грунтов в условиях сложного напряженного состояния, выявленные в работах Г.И. Ломизе и его учеников, С.С. Вялов формулирует обобщенные реологические уравнения состояния. Эти уравнения отражают влияние всех инвариантов тензора напряжений σ_{ij} на деформации ϵ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) с учетом фактора времени. Используется форма ин-

тегральных уравнений Вольтерры, как это делается в теории наследственной ползучести:

$$\epsilon(\tau) = \frac{\sigma(\tau)}{E_0} + \lambda \int_0^{\tau} K(\tau; \xi) \sigma(\xi) d\xi,$$

где τ – время; E_0 – “мгновенное” значение модуля Юнга; λ – числовой параметр; $K(\tau, \xi)$ – ядро ползучести “стареющего” материала.

Все теоретические предположения относительно вида уравнений состояния проверяются сопоставлением их с интенсивно проводимыми в этот же период экспериментальными исследованиями под руководством С.С. Вялова (Н.К. Печкарская, Е.П. Шушерина, С.Э. Городецкий и др.).

Особенностью работ С.С. Вялова всегда являлось доведение теоретических исследований до ясной формы с обязательной разработкой методических рекомендаций по их применению. Проблема уравнений состояния, отражающих поведение грунтов в условиях сложного напряженного состояния с учетом фактора времени, С.С. Вялов посвящает ряд работ с подробным изложением методики обработки экспериментальных данных для получения необходимых параметров с целью их практического использования [Вялов и др., 1962, 1966] и позднее [Вялов, 1978].

Данные по температурным деформациям мерзлых пород представляют практический интерес в связи с прогнозом напряженного состояния мерзлых толщ, морозобойного растрескивания территории строительных площадок, а также исследования “полигональных образований”, вызванных растрескиванием пород.

Проводя измерения деформаций образца, свободного от внешней нагрузки, при изменении температуры T , И.Н. Вотяков и С.Е. Гречищев [Гречищев, 1970] обнаружили эффект “последствия” температурных деформаций. Этот эффект тесно связан с реологией мерзлых грунтов, разработанной С.С. Вяловым с учениками.

Позже было показано [Мерзляков, Рудых, 2010], что выражение для температурных деформаций

$$\epsilon_{ij} = \tilde{\alpha}_{ij} (T(\tau) - T_0) + \int_0^{\tau} L_{ij}(T(\xi); \tau, \xi) (T(\xi) - T_0) d\xi$$

(где $\tilde{\alpha}_{ij}$ – обобщенный коэффициент температурного расширения; $L_{ij}(T(\xi); \tau, \xi)$ – ядро последствия) представляет собой достаточно общее уравнение состояния, учитывающее зависимости влажности (по незамерзшей воде), льдистости и структуры от температуры.

В 1970-х и начале 1980-х гг. С.С. Вялов с учениками (Ю.К. Зарецкий, Р.В. Максимаков, Н.К. Печкарская) успешно развивают кинетическую теорию прочности и ползучести грунтов. В основу

этой теории положены результаты экспериментальных исследований изменения микроструктуры глинистых грунтов в процессе деформирования во времени, проведенные Р.В. Максимаком и Н.К. Пекарской [Вялов и др., 1970]. Связь кинетики деформаций со структурными изменениями теоретически была представлена в работе [Вялов и др., 1973], а критерий разрушения глинистых грунтов сформулирован на основе экспериментального факта. Р.В. Максимаком было показано, что достижение степени поврежденности структуры грунта в результате накопления дефектов критического значения можно рассматривать в качестве критерия длительного разрушения.

С.С. Вяловым подробно рассмотрены закономерности длительного разрушения грунтов и дана интерпретация физического смысла параметров, входящих в уравнение длительной прочности. Им показано, что разрушение глинистых грунтов хорошо согласуется с представлениями кинетической теории, которая рассматривает разрушение как термофлуктуационный процесс нарушения и восстановления связей, активируемый воздействием внешней силы.

О термодинамическом подходе в механике грунтов Сергей Степанович заявил на Третьем всесоюзном симпозиуме по реологии грунтов (Ленинград, сентябрь 1979 г.). Он еще ранее высказывал мысль о том, что физику, теплофизику и механику мерзлых грунтов можно объединить с помощью термодинамики. Возможно, это и будет “общая” теория инженерного мерзлотоведения.

С.С. Вялов прекрасно понимал, что термодинамика позволяет обойти трудную проблему многих тел или частиц, не нуждается в определенной модели внутреннего строения исследуемых тел, давая возможность, вместе с тем, использовать молекулярные и микроскопические данные, если таковые имеются.

Известно, что для неравновесных процессов $TdS > \delta Q$ или $TdS = \delta Q + \delta W^*$, где δQ – количество теплоты, которым обменивается система с внешней средой в элементарном процессе; dS – изменение энтропии; δW^* – энергия диссипации (работа на необратимых вязкопластических деформациях). Энергия диссипации является “мостиком”, позволяющим выразить вязкопластические деформации с помощью термодинамических соотношений.

Сергей Степанович изложил последовательно эти мысли в замечательной статье “Термодинамические основы механики мерзлых грунтов” [Вялов, 1988]. В ней он рассматривает грунт как открытую термодинамическую систему, поэтому приток тепла обеспечивается не только теплопроводностью и фазовыми переходами, но и массопереносом (миграцией влаги).

В конце 1980-х и начале 1990-х гг. С.С. Вялов совместно со своим учеником В.Н. Разбегиним разрабатывает энтропийный подход при формулировке уравнения длительной прочности [Разбегин, 1995]. Согласно этому подходу, разрушение наступает при достижении приращением плотности энтропии некоторого критического значения. В этом случае деформация при разрушении зависит от действующего напряжения и определяется критическим значением работы вязкопластических деформаций.

Термодинамический подход в механике грунтов, по-видимому, имеет большую перспективу, и можно надеяться, что в будущем появятся существенные обобщения определяющих соотношений теории вязкопластического течения грунтовых сред, полученные с его помощью.

Последние годы Сергей Степанович – профессор кафедры механики грунтов, оснований и фундаментов МИСИ. Он продолжал выступать на конференциях и семинарах. Слушая его, невозможно было не почувствовать две важнейшие черты его выступлений: глубокое уважение к хрестоматийным основам науки и стремление сделать понятными свои мысли широкой аудитории, чего он и достигал ясным изложением и тщательностью подготовки. Его доводы всегда были “прозрачны” и обоснованы, терминология – корректна.

Заканчивая этот краткий обзор работ профессора С.С. Вялова, посвятившего всю свою творческую жизнь служению науке, необходимо сказать и о его чисто человеческом подвиге. Он не переставал работать ни на одну минуту даже в последние пять лет своей жизни, будучи абсолютно слепым. Потеряв зрение, Сергей Степанович не только не стал обузой для своих близких и коллег по работе, но продолжал вести работу со своими учениками на кафедре МГСУ и активно принимал участие в заседаниях кафедры и Ученых советов. Трудно представить, какие творческие, моральные и физические усилия потребовались Сергею Степановичу, чтобы продиктовать свою последнюю монографию “Реология мерзлых грунтов” объемом 25 печ. листов, которая вышла в свет в 2000 г., уже после смерти ученого.

Сергей Степанович оставил яркий след в науке как выдающийся ученый в области механики грунтов и инженерного мерзлотоведения, основоположник нового направления в механике грунтов – реологии. Имя С.С. Вялова получило мировое признание, и сейчас трудно встретить в России и за рубежом публикации по инженерному мерзлотоведению и реологии грунтов без ссылок на его работы. Его идеи продолжают свое развитие в трудах ученых молодого поколения.

Литература

- Вялов С.С.** Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1959, 191 с.
- Вялов С.С.** Реологические основы механики грунтов. М., Высш. шк., 1978, 448 с.
- Вялов С.С.** Термодинамические основы механики мерзлых грунтов // Термодинамические аспекты механики мерзлых грунтов. М., Наука, 1988, с. 3–17.
- Вялов С.С.** Реология мерзлых грунтов. М., Стройиздат, 2000, 464 с.
- Вялов С.С., Гмошинский В.Г., Городецкий С.Э. и др.** Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунто-вых ограждений. М., Изд-во АН СССР, 1962, 254 с.
- Вялов С.С., Городецкий С.Э., Ермаков В.Ф. и др.** Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов. М., Наука, 1966, 131 с.
- Вялов С.С., Зарецкий Ю.К., Городецкий С.Э.** Расчеты на прочность и ползучесть при искусственном замораживании грунтов. Л., Стройиздат, 1981, 200 с.
- Вялов С.С., Зарецкий Ю.К., Максимяк Р.В.** Кинетика структурных деформаций и разрушения глин // Труды VIII Междунар. конгресса по механике грунтов и фундаментостроению. М., Стройиздат, 1973, с. 13–24.
- Вялов С.С., Пекарская Н.К., Максимяк Р.В.** О физической сущности процессов деформирования и разрушения глинистых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1970, № 1, с. 7–9.
- Гречищев С.Е.** К основам методики прогноза температурных напряжений и деформаций в мерзлых грунтах. М., ВСЕГИНГЕО, 1970, 53 с.
- Мерзляков В.П., Рудых О.Л.** О коэффициенте температурного расширения мерзлых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2010, № 5, с. 14–19.
- Разбегин В.Н.** Вязкопластичность льда и некоторых типов грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1995, № 6, с. 2–8.

*Поступила в редакцию
11 ноября 2010 г.*