

№2, 2000

## **Анализ причин деформаций откоса Обводного канала между Предтеченским и Ново - Каменным мостами**

**Р.Э.Дашко, О.А.Александрова**

В конце марта 1999 года между указанными в названии статьи мостами произошла деформация левобережного склона Обводного канала, сопровождавшаяся опусканием дневной поверхности, а также смещением шпунтового ограждения в низовой части откоса. В зоне развития деформаций оказался электрический кабель, который проходит в металлической трубе диаметром 250мм, заполненной маслом под давлением 15 атмосфер. Прогиб трубы достиг значительной величины. Повреждение кабеля могло привести к прекращению подачи энергии в метрополитен и промышленные предприятия. Кроме того, наблюдаемые подвижки вызвали развитие неравномерных деформаций домов №46-48 по набережной Обводного канала, в стенах которых было зафиксировано прогрессирующее образование трещин.

Для выяснения причин деформаций на этом участке были привлечены специалисты ряда проектных и изыскательских организаций; в том числе Трест Грии, ЗАО Лентисиз, институт Ленгипроинжпроект, НПСФ Спецстройсервис, Геофизпрогноз, НПП Нейво, силами которых было реализовано бурение скважин, зондирование, геофизические работы, а также выполнен анализ состояния откоса. Проведенные исследования позволили уточнить инженерно-геологический разрез аварийного участка и прилегающих территорий, определить показатели состояния и физико-механических свойств пород, а также положение уровня грунтовых вод и их химический состав. На первом этапе исследований были высказаны предположения о возможной роли суффозионных процессов в слое песков, залегающих непосредственно под техногенными (насыпными) образованиями, что привело к оседанию дневной поверхности и деформациям оболочки кабеля, проходящего в насыпных грунтах.

Аварийный участок откоса Обводного канала располагается между двумя засыпанными водотоками, что подтверждается данными радиолокационных исследований. На продольных геофизических профилях между двумя вышеупомянутыми мостами отчетливо фиксируются засыпанные русла, одно из которых принадлежит р.Волковке, а второе - Лиговскому каналу. Река Волковка до строительства Обводного канала, которое началось в 1804 году, в пределах исследуемого участка имела меандру, которая была засыпана, а сама река частично была трансформирована в левый приток Обводного канала. В нижнем течении р. Волковка была расширена, углублена и превращена в трассу Обводного канала. Лиговский канал был сооружен в первой четверти 18 века. Он просуществовал свыше двух столетий. К концу 19 века была засыпана часть канала от Бассейной улицы (ул. Некрасова) до Обводного канала, а в 1926 году - от Обводного канала до Краснопутиловской улицы. Соответственно, деформации произошли в пределах ослабленного блока грунтов, ограниченного техногенными телами двух ликвидированных водотоков.

Исследуемый участок приурочен к южной границе нижней Литориновой террасы и имеет типичный геолого-литологический разрез для этой геоморфологической зоны. Следует также отметить, что рассматриваемая территория размещается в пределах субмеридиональной погребенной долины, которая является системой долины Пра - Невы. Наиболее прочные моренные отложения - суглинки с крупнообломочными включениями, вскрыты на глубине более 10 м. В анализе причин и характера деформаций откоса эти отложения не играют никакой роли, поскольку Обводный канал заложен в более молодых образованиях: озерно-ледниковых отложениях Балтийского ледникового озера и осадках Литоринового моря, перекрытых техногенными грунтами. В разрезе озерно-ледниковых отложений наибольшим

распространением пользуются ленточные глины, мощность которых постепенно уменьшается в направлении Лиговского проспекта. Для литориновых отложений, перекрывающих озерно-ледниковые породы, характерна изменчивость их дисперсности: в нижней части этого слоя залегают пылеватые супеси, которые сменяются вверх по разрезу песками, содержащими органические остатки. Следует отметить выдержанную мощность литориновых песков, которая изменяется в пределах 1,2-1,4м вдоль разреза аварийного участка между двумя мостами. Отложения Литоринового моря перекрывает слой насыпных грунтов мощностью до 5,3м, представленный песчано-супесчаными разностями со строительным мусором. Грунтовые воды были встречены на глубине 2,4- 4,1м (март-апрель 1999года). Гидродинамический и гидрохимический режим водоносного горизонта на этом участке определяется природно-техногенными факторами: - возможностью свободной разгрузки подземных вод в канал и утечками из канализационной системы, о чем свидетельствует заметное содержание аммония - до 13,5 мг/л. Основные компоненты химического состава приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Содержание ионов, мг/л.                |                  |                  |                               |                 |                               |                                    | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | Минерализация<br>мг/л |
|--|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------|
| Na <sup>+</sup><br>+<br>K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Fe <sup>2+</sup> +Fe <sup>3+</sup> | св<br>мг/л      | мг/л           |                       |
| 288                                    | 72               | 50               | 936                           | 150             | 67                            | 24                                 | 110             | 20,8           | 1599                  |

Существование промывного режима водоносного горизонта в приоткосной части канала обеспечивает более низкие значения перманганатной окисляемости (20,8 мг/л), содержания аммония, сульфатов и хлоридов, а также минерализации грунтовых вод по сравнению с зонами, где отсутствует их дренирование из-за непроницаемых ограждающих конструкций набережных (островная часть исторического центра города). Загрязнение канализационными стоками песчано-глинистых грунтов приводит к существенному ухудшению их состояния и свойств за счет активизации физико-химических и биохимических процессов. Негативное влияние на дисперсные породы оказывают ионы NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, сорбция органических компонентов биотического и абиотического генезиса, содержащихся в канализационных водах. Эти положения находят свое подтверждение в результатах исследований показателей физического состояния глинистых пород и их сопротивления сдвигу.

Литориновые супеси и озерно-ледниковые суглинки и глины имеют текучую, реже текучепластичную консистенцию. При испытании озерно-ледниковых отложений в условиях трехосного сжатия углы внутреннего трения таких грунтов уменьшаются до 5<sup>0</sup> и менее, а сцепление составляет 0,02 МПа и ниже. Литориновые пески имеют связность, обусловленную наличием природной и техногенной органики (C ~ 0,02 МПа), и углы внутреннего трения менее 20<sup>0</sup>, литориновые супеси - более низкие показатели сопротивления сдвигу (C~0.01 МПа и  $\phi_{Ж} = 13^0$ ). Глинистые грунты обладают ярко выраженными тиксотропными свойствами. Для установления причин развития аварийных деформаций на рассматриваемом участке Обводного канала была произведена проверка возможности развития суффозионных процессов в литориновых песках с применением различных критериев. Известно, что вероятность протекания суффозии определяется действующим градиентом напора (I<sub>д</sub>) и неоднородностью гранулометрического состава песков, при этом I<sub>д</sub> должен быть меньше допустимого (I<sub>доп</sub>). Коэффициент неоднородности ( $\phi_{\cdot}$ ) литориновых песков обычно не превышает 7. В практике расчетов суффозионных процессов при  $\phi_{\cdot} < 10$  значение I<sub>доп</sub> должно

быть более 0,4. В реальных условиях на рассматриваемом участке  $I_d$  составлял 0,18, что позволило сделать однозначный вывод о невозможности протекания суффозионных процессов согласно гидродинамическому критерию. Кроме того, были выполнены расчеты по оценке соотношения максимального диаметра пор в песке ( $d_{max}$ ) по сравнению с минимальным размером частиц ( $d_{min}$ ): при  $0,77d_{max} < d_{min}$  грунт считается несуффозийным. Дополнительно, вероятность суффозии проверялась по соотношению критической и реальной скорости фильтрации грунтовых вод. Проверка по различным условиям формирования выноса тонкой фракции из песчаного слоя дала отрицательный результат. Следует также отметить, что при активно протекающем суффозионном процессе, опускание (просадка) дневной поверхности сопровождается уменьшением мощности песков, что не наблюдается в реальных условиях. Как уже отмечалось выше, разница в толщине слоя литориновых песков не превышает 0,2 м на всем протяжении аварийного участка. Кроме того, наличие органических остатков в песках, сопровождающееся формированием сцепления, в значительной мере препятствует развитию суффозии. Анализ характера протекания деформаций дневной поверхности и откоса Обводного канала дает возможность предположить о существовании в этой зоне оползневых смещений. В пользу этой гипотезы свидетельствуют следующие явления, которые фиксировались визуально, а также по результатам проведенных изысканий:

1. Наличие трещин закола (растяжения), которые ограничивают участок опускания дневной поверхности в форме оползневого цирка, максимальная ширина зоны смещения от бровки откоса составляла 1,0-1,1Н, где Н - высота откоса, равная 8,7 м. Такое размещение трещин закола определяет положение наиболее вероятной поверхности скольжения при развитии оползневых смещений в толще слабых грунтов.
2. По результатам проведенного бурения и зондирования зафиксировано изменение характера контакта озерно-ледниковых отложений с наиболее плотными и прочными моренными суглинками: нижняя граница ленточных глин плавно изгибается вверх и приблизительно под углом  $45^{\circ}$  входит в акваторию Обводного канала, что соответствует положению поверхности скольжения в толще пластичных глинистых грунтов с  $\phi = 0^{\circ}$  в нижней части откоса. Следует также отметить, что предполагаемая поверхность скольжения проходит в зоне ленточных глин с наиболее высокой влажностью, составляющей 0,44.
3. Значительное опускание дневной поверхности сопровождалось выполаживанием откоса Обводного канала и поворотом шпунтовых ограждений в его нижней части.

Следует подчеркнуть, что по всей вероятности оползневые смещения развивались длительное время, что характерно для подобного разреза слабых грунтов. Неравномерные деформации домов 46-48 по набережной Обводного канала являлись следствием уменьшения боковой пригрузки за счет постепенного опускания проезжей части набережной. Проводившиеся в 1998-99 г.г. строительные работы с применением динамических воздействий, тяжелого оборудования в условиях широкого развития тиксотропных грунтов (литориновые и озерно-ледниковые отложения) в разрезе откоса канала значительно интенсифицировали оползневой процесс за счет возрастания его скорости.

Качественная оценка возможности развития оползневых деформаций была проверена расчетом, который был проведен при фиксированном положении поверхности скольжения, определенной визуально, а также с учетом данных бурения и зондирования. Кроме того, было учтено положительное влияние наличия шпунтового ограждения по соотношению сил активного и пассивного давления в нижней части откоса. Расчетные параметры оползневого откоса: его высота  $H=8,7$ м, положение поверхности скольжения в плане от бровки откоса до центра оползневого цирка 9,5м. В месте выхода поверхности скольжения формируется вертикальная плоскость  $H_{90} = 2,5M$ , в которой развиваются растягивающие напряжения.

Плоскость отрыва размещается полностью в техногенных отложениях, затем поверхность скольжения под углом  $\beta = 45^\circ + \phi/2$  к горизонту уходит на глубину 8,0м и далее проходит по слабому прослою ленточных глин (ниже дна канала) с дальнейшим ее подъемом под углом  $45^\circ$  и выходом в канал. Расчетные параметры физико-механических свойств грунтов приведен в табл. 2.

Таблица 2

| №слоя | Наименование грунта | Мощность слоя,м | Удельный вес,кН/м <sup>3</sup> | Сцепление,МПа | Угол внутреннего трения ,град |
|-------|---------------------|-----------------|--------------------------------|---------------|-------------------------------|
| 1     | Техногенный         | 5,3             | 19,7                           | 0,02          | 11                            |
| 2     | Песок литориновый   | 1,3             | 19,4                           | 0,02          | 20                            |
| 3     | Супесь литориновая  | 1,5             | 16,2                           | 0,01          | 13                            |
| 4     | Ленточная глина     | 2,6             | 18,2                           | 0,02          | 5                             |
|       |                     |                 |                                | 0,012         | 0                             |

Влияние подземных вод учитывалось введением гидродинамического давления  $D_i$  при расчете суммы удерживающих сил. Коэффициент устойчивости  $n$  определялся по известной формуле.

$$n = \frac{[\sum(N_i - D_i) \operatorname{tg}\phi_i + \sum c_i l_i]}{\sum T_i}, \text{ где}$$

$N_i$  и  $T_i$  - нормальные и касательные (сдвигающие) составляющие в каждом расчетном блоке;  $\operatorname{tg}\phi_i$  и  $c_i$  - параметры сопротивления сдвигу в каждом блоке;  $l_i$  - длина плоскости скольжения в каждом блоке. Значение  $n$  при параметрах, приведенных в табл.2, составляет 1,16. При воздействии динамических нагрузок значение угла внутреннего трения литориновых песков существенно уменьшается, при  $\phi \leq 15^\circ$  величина  $n$  становится менее 1,0.

Предположение о возможности развития оползневых деформаций на данном участке откоса Обводного канала было высказано также профессором кафедры гидрогеологии и инженерной геологии СПбГИ (ТУ) И.П. Ивановым в ходе проведения экспертизы аварии.

Прогноз возможности развития деформации откосов многочисленных рек и каналов в Санкт-Петербурге и обеспечение их длительной устойчивости является одной из важных проблем надежности функционирования городской инфраструктуры, учитывая сложность инженерно-геологических, гидрогеологических и геоэкологических условий верхней части разреза подземного пространства. В настоящее время назрела необходимость проведения комплексной экспертизы состояния конструкций набережных и организация их мониторинга в пределах наиболее опасных и ответственных участков, в первую очередь, в историческом центре города. При этом, весьма важен вопрос применения щадящих технологий строительства, ремонта и реконструкции набережных в условиях широкого развития песчано-глинистых грунтов, обладающих плавунными и тиксотропными свойствами, а также

разработка принципиально новых конструкций набережных в специфических геотехнических и геоэкологических условиях.